

— 修士論文 —

GPS 地表反射波を用いたリモートセンシングにおける
偏波情報を考慮した実験的評価

EXPERIMENTAL EVALUATIONS WITH POLARIMETRIC
INFORMATION FOR REMOTE SENSING USING GPS SIGNALS
REFLECTED ON SOIL SURFACE

平成 24 年 2 月 8 日

指導教官： 齋藤宏文 教授

東京大学大学院
工学系研究科電気系工学専攻

加藤 竜太

内容梗概

本研究は、GPSを用いたリモートセンシングの基礎実験を行い、GPSリモートセンシングの有効性を評価することを目的としている。また、将来の宇宙ミッションに先んじて、地上でのパイロット実験を行うという側面も持つ。

現在のGPSリモートセンシングでは、GPS衛星からの直接波と対象物からの反射波がつくる干渉波振動を解析して、対象物の特性を取り出す方法が主流である。数ある測定対象のなかでも、本研究では土壌水分と植生に焦点を当てている。

土壌水分を扱った過去研究の多くは、土壌水分によって土壌の誘電率が変化することを利用して、水分量の観測を行っている。しかし、植生がない裸土を扱っている場合がほとんどであり、植生が存在する土壌における水分の観測は困難であると考えられてきた。

上記の問題に対し、本研究では偏波情報による解決を図った。偏波に関する情報は、GPSリモートセンシングの分野では重視されておらず、この情報を用いることは当該分野において新しい試みである。まず、土壌水分と植生のそれぞれについて、干渉波振動中に表れる特徴量を挙げた。次に、受信アンテナの偏波を切り替えることによって、欲しいパラメータの特徴量のみを干渉波振動中で強く表出させる方法を提案した。そして、この提案手法を実験とシミュレーションを用いて評価した。

目次

第1章	はじめに	2
第2章	研究の背景	3
2.1	GPS リモートセンシングの概要	3
2.2	基本原理	5
2.2.1	マイクロ波の散乱現象	6
2.2.2	直接波と地表反射波の干渉現象	8
2.3	研究例	9
2.3.1	海面高度	9
2.3.2	バイオマス	10
2.3.3	海氷	10
2.3.4	土壌	11
第3章	GPS リモートセンシングにおける偏波情報の利用	14
3.1	干渉波中の土壌水分・植生の特徴量分析に対する偏波情報の利用	14
3.2	ブリュースタ角と土壌水分量	15
3.3	干渉波振動中の高周波成分と植生量	17
3.4	提案手法	18
第4章	シミュレーション	20
4.1	short wire モデル	20
4.2	受信電波の各成分の記述	21
4.3	シミュレーションの結果	23
4.3.1	植生のある土壌における土壌水分量の判別（垂直偏波アンテナ）	23
4.3.2	植生量の判別（右旋円偏波アンテナ）	24
第5章	実験	27
5.1	植生のある土壌における土壌水分量の判別（垂直偏波アンテナ）	28
5.2	植生量の判別（右旋円偏波アンテナ）	31

第6章 　むすび	38
6.1 　まとめ	38
6.2 　今後の発展	39
謝　　辞	40
発　表　文　献	41
参　考　文　献	42

表 目 次

3.1	Variation of Brewster angle [7]	17
5.1	Total power of high frequency (>2000Hz) spectrum	35

目次

2.1	Japan-centered GPS satellite "MICHIBIKI" (JAXA)	4
2.2	Mono-static (left) and Bi-static (right)	5
2.3	Ground experiment for future mission	5
2.4	Basic configuration of remote sensing using GPS	6
2.5	Two types of microwaves scattering [9]	7
2.6	Relation between incidence angle and backscattering cross-section in 3 cases of surface roughness (rough, moderately rough, and smooth surface) [9]	8
2.7	Geometric model of interaction between direct signal and reflected signal	9
2.8	Example of interference pattern	10
2.9	Geometry of direct and reflected signals in the Zeeland Bridge experiment[12]	11
2.10	Relationship between biomass and back scattering coefficient [9]	12
2.11	Difference of main contributing scattering method by salt content in the ice. In salty case (a), contribution of surface scattering is much greater than that of volume scattering. But contribution of volume scattering increases by decrease of salinity as case (b) [9]	13
3.1	Feature amount of soil moisture and vegetation in interference signal, soil moisture is characterized by Brewster angle, and vegetation is by high- frequency fluctuations	15
3.2	No reflection of vertically polarized wave at Brewster angle	16
3.3	Reflectivity change calculated by the Fresnel equation ($\epsilon_{r2} = 4$), vertically polarized wave (left) and horizontal polarized wave (right)	17
4.1	Polar pattern in short wire model	21
4.2	Configuration of simulating received signals by the antenna	22
4.3	Simulated interference power, with dielectric constant of soil ϵ_{r2} or vegetation amount changed	25
4.4	Simulated interference pattern, with vegetation condition changed	26

目次

5.1	GPS signals receiver (EVK-5H, u-blox)	28
5.2	Tracking GPS satellites by Planning (Trimble)	29
5.3	Dipole antenna (vertically set to surface at experiment)	30
5.4	Experiment setup in the bare soil field (Tamagawa riverside)	30
5.5	Experiment setup in the vegetated field (Tamagawa riverside)	31
5.6	Grasses on vegetation field at 10-15cm height (Tamagawa riverside)	31
5.7	Reflectivity value of reflecting surface, dry soil case ($\epsilon_{r2} = 4$) and wet soil case ($\epsilon_{r2} = 20$)	32
5.8	Raw data of interference power by ground experiments, with VWC(Volumetric Water Content) or vegetation condition changed	33
5.9	Part of raw data of Fig.5.8(by elevation angle from 30 to 50)	34
5.10	RHCP antenna	34
5.11	Much vegetated surface (Tsurumi riverside)	35
5.12	Little vegetated surface (Tsurumi riverside)	35
5.13	Raw data of interference pattern, with vegetation condition changed	36
5.14	Spectrum power of the interference signal of Fig.5.13(a)	37

第1章 はじめに

本研究は、GPS を用いたリモートセンシングの基礎実験を行い、測定対象物の特性を抽出するためにGPS リモートセンシングを適用する場合の有効性を評価することを目的としている。また、将来的に実現されるであろう宇宙でのミッションを鑑みて、まずは地上のアンテナを用いた実験を行い、当該宇宙ミッションの実行可能性を評価するという側面も持つ。

現在のGPS リモートセンシングでは、GPS 衛星からの直接波と、対象物からの反射波が干渉することによって生じた干渉波振動を解析して、対象物の特性を取り出す方法が主流である。GPS リモートセンシングを用いることによって、海面高度、森林、氷、土壌など地球上のさまざまな種類のものが計測可能であるが、土壌の観測は特にその応用範囲が広く、研究対象として価値が高い。実際のところ、土壌を観測対象としたGPS リモートセンシングの研究が数多く報告されている。土壌を構成するパラメータのなかでも特に土壌水分を扱った研究の多くは、土壌水分によって土壌の誘電率が変化することを利用して、水分量の観測を行っている。しかし、仮定が少なく済む裸土を扱っている場合がほとんどであり、植生が存在する土壌における水分の観測は困難であると考えられてきた。

上記の問題に対し、本研究では偏波情報による解決を図った。偏波に関する情報は、GPS リモートセンシングの分野で過去にあまり考慮されてきておらず、マイクロ波がもつ偏波の性質を追加情報として用いることは、当該分野において新しい試みである。干渉波振動のうち、大きな振幅を持つ波とそれに重畳した高周波成分とが、それぞれ水分や植生単体から強い影響を受けていることに着目した。本研究では、土壌水分と植生のそれぞれについて、干渉波振動中に表れる特徴量を提案する。また、受信アンテナの偏波を切り替えることによって、欲しいパラメータの特徴量のみを干渉波振動中で強く表出させることが可能であることを利用し、定めた特徴量が実測値に対してどの程度の応答をもつか、実験とシミュレーションによって評価する。

本稿の構成は以下のとおりである。第2章を導入と位置づけ、GPS を用いたリモートセンシングの基礎を含めた研究背景を述べる。第3章では、土壌水分と植生それぞれに対応する特徴量を提案する。続く第4章で提案手法の有効性を検証するために必要なシミュレーションについて述べ、第5章で屋外で実施した検証実験について報告する。さらに第6章で本稿をまとめ、稿末の第7章で今後の検討をする。

第2章 研究の背景

2.1 GPS リモートセンシングの概要

GPS (Global Positioning System) は、米国国防総省によって元は軍事的用途のために開発された位置測位システムである。1978年に初めてGPS衛星が打ち上げられて以来、次第にその数を増やし、2012年2月現在では、32個のGPS衛星が地球の上空を飛行している。また、GPSはアメリカが開発したシステムであるが、他国もアメリカに追随して同様のシステムを開発しており、ロシアのGLONASSやヨーロッパのGalileo、あるいは中国のCOMPASSといったものがある。日本においても、2010年9月に初の日本向けGPS衛星である「みちびき」(図2.1)の打ち上げが実施されており、国内では近年ますますの注目を浴びている。

GPS衛星は、主に以下の特徴をもつ。

- 約12時間で1周まわる準同期軌道(高度約20000km)を描く
- 通信用にL1(1575.42MHz)とL2(1227.6MHz)の2つの周波数の搬送波を送信する
- 衛星固有の疑似雑音符号(PRN:Pseudo Random Noise)コードを載せた通信を行う

受信側では、上記PRNコードを復調することによって個々の衛星を見分けることができ、同じく搬送波に乗せられた航法メッセージを解析して、信号を送った衛星の方位角・仰角といった情報を得る。

すべてのGPS衛星は24時間いつでも地球に向けて信号を発しており、受信者は複数のGPS衛星から信号を受け取ることで、地球上における受信者の3次元座標上の位置を特定することができる。こうした受信者位置の特定がGPSが担う本来のミッションであるが、民間でも簡単に利用出来るようになったことで、近年ではGPS衛星を信号送信デバイスとして利用したりリモートセンシングが盛んである。

GPSを利用したりリモートセンシングは、ほかの方法によるリモートセンシングに比べ、次のような利点をもつ[1]。

1. GPS衛星を送信機として適用可能

既存のGPS衛星をそのまま送信機として適用できるため、新たに送信機を用意するコストを抑えることができる



図 2.1: Japan-centered GPS satellite "MICHIBIKI" (JAXA)

2. GPS 衛星の軌道運動を利用した測定

信号の送信機である GPS 衛星は、地球上空を決まった軌道に従って飛行する。それに伴い、仰角をはじめとしたいくつかの条件は自動的に変動するため、事前に飛行軌道を予測することによって条件を変えた測定を容易に実施できる。また、受信するアンテナの高さにも依存するが、待っているだけで広範囲の対象を測定することができるということも意味する

3. 感度の良い波長の信号

GPS 衛星から発せられる電波は L バンド (約 20cm) の波長をもつ。この長さは、地球上に存在するさまざまな測定対象のサイズにマッチするため、精度の良い測定が可能である

4. バイスタティックレーダ方式

バイスタティック (bi-static) レーダ方式は、送信機と受信機が異なる位置に配置されているレーダ方式である (図 2.2)。送信機と受信機が同じ位置にあるモノスタティック (mono-static) レーダ方式と比較して、後方散乱以外の電波も受信可能であることや、将来的には小型衛星群によるマルチスタティックレーダが可能であるといった特長をもつ。送信機と受信機、双方に対して宇宙に浮かぶ衛星を適用することが可能となれば、人間の立ち入ることが困難な場所におけるセンシングをさらに容易に実施できるようになることが期待される

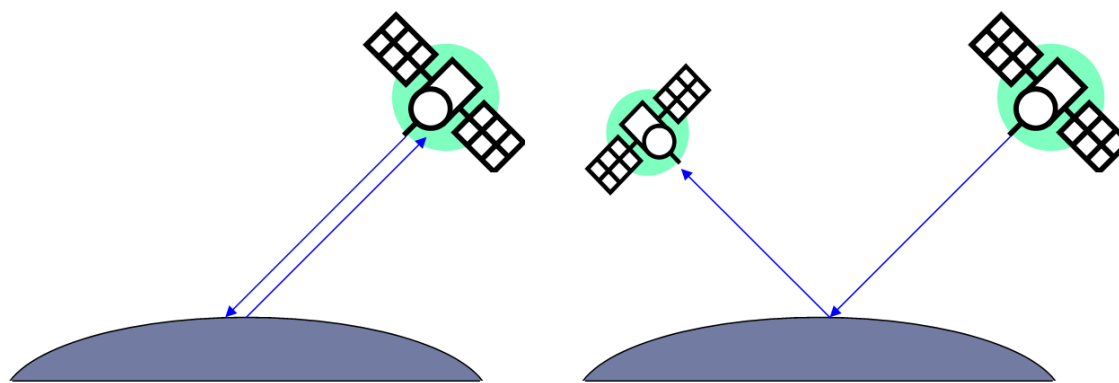


図 2.2: Mono-static (left) and Bi-static (right)

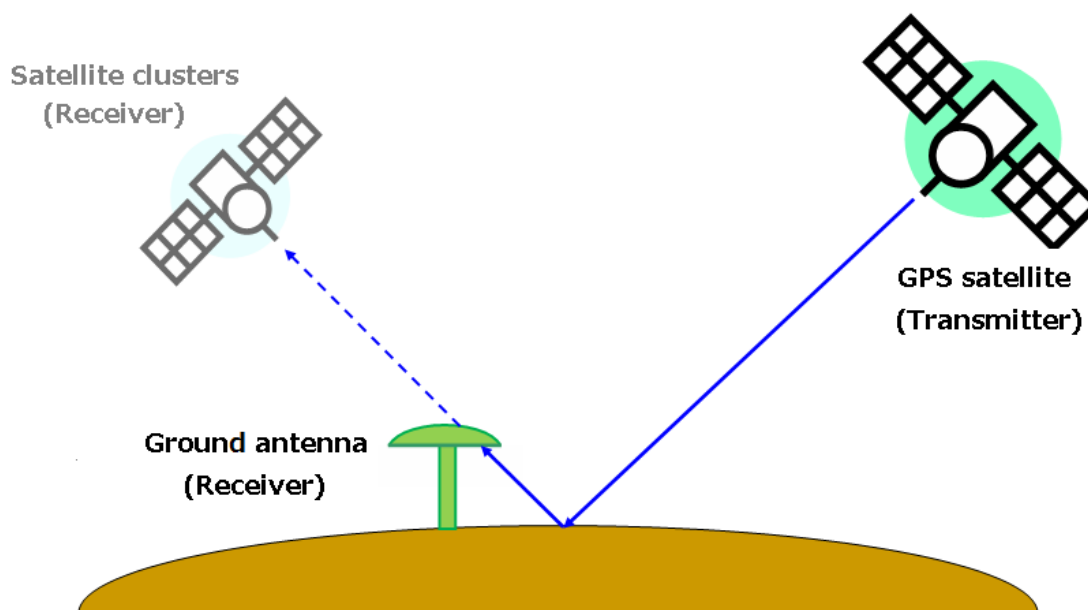


図 2.3: Ground experiment for future mission

本研究は、上記に挙げたバイスタティックレーダの基礎実験という側面を持ちあわせている。将来は小型衛星を用いて受信することを目指す。まずは地上に配置したアンテナを用いて受信することによって、関連する小型衛星ミッションの実現可能性を確かめようとするねらいをもつ(図 2.3)。

2.2 基本原理

GPS リモートセンシングを行う際の基本配置図を図 2.4 に示す。以下では、GPS リモートセンシングを理解する上で必要な基本原理について説明する。

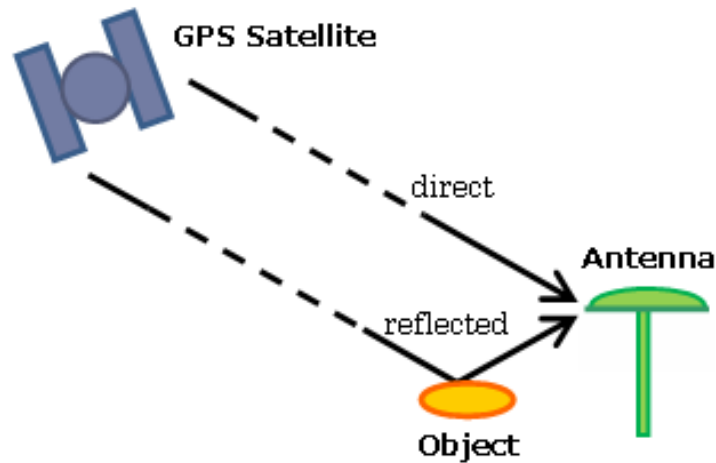


図 2.4: Basic configuration of remote sensing using GPS

2.2.1 マイクロ波の散乱現象

電波がもともと存在した媒質とは異なる誘電率をもつ媒質に波が入射するとき、吸収されたマイクロ波の一部が再放射される。これを散乱現象と呼ぶ。散乱現象は、その発生プロセスの違いから、次の 2 種類の方式に大別される [9]。

- 表面散乱 (surface scattering)
- 体積散乱 (volume scattering)

これら 2 つの散乱光の強度は、それぞれ異なるパラメータに依存するため、対象物の特性を厳密に解析するためには上記散乱プロセスの違いを理解することが必要となる。本節では、おのこの散乱方式について詳しい説明を加える。

表面散乱

表面散乱は、異なる誘電率をもつ媒質の境界面で起こる現象である (図 2.5(a))。表面散乱による受信波の強度は、媒質境界面の粗さ (ラフネス) に大きく依存する。モノスタティックレーダ形式を用いる場合、基本的には、送信したマイクロ波のうち媒質境界面に入射したときの向きと正反対の向きに散乱された成分 (後方散乱成分) だけが受信可能である。ラフネスの値が大きいほど拡散散乱成分が増加し、それに伴い後方散乱成分も増加するため、モノスタティック形式の場合における受信波強度は強くなる。ただし、入射角が 0° に近い場合においては、入射して来る方向と散乱して行く方向が近いため、ラフネスの値が小さいほうが受信波強度が強くなる。モノスタティック形式における後方散乱係数と入射角との関係を異なるラフネスごとにプロットしたものを図 2.6 に示す。

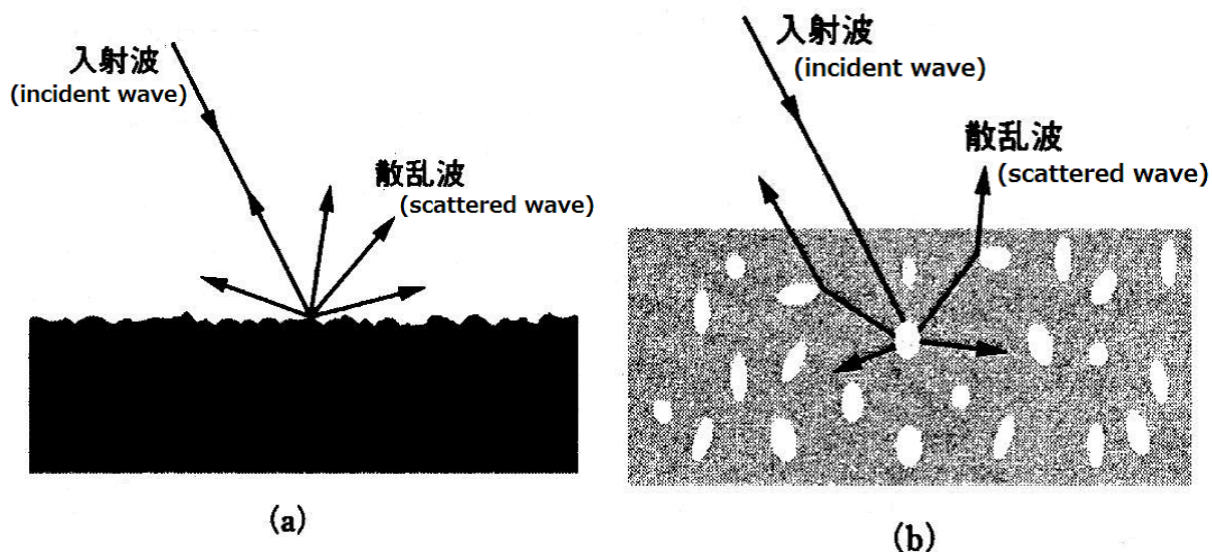


図 2.5: Two types of microwaves scattering [9]

一方、モノスタティック形式と違い、バイスタティック形式においては、受信アンテナは主に媒質境界面で鏡面反射した成分を受信する。ラフネスの値が小さいほど鏡面反射成分は増加するため、バイスタティック形式の場合における受信波強度は単純にラフネスが小さいほど強くなる。

体積散乱

体積散乱は、媒質内部の誘電率の部分的違いが原因となって起こる散乱である(図2.5(b))。入射するマイクロ波が媒質の内部深くに侵入するほど、体積散乱の寄与は増加する。具体的には、

- 入射波の波長が長い
- 媒質の表面がなめらか(ラフネスが小さい)
- 媒質の導電率が小さい

これら3つの要因が強いほど、表面散乱に対する体積散乱の寄与が大きくなる。1つの境界面のみを考慮すればよい表面散乱に比べ、体積散乱は複数の境界面における散乱をすべて考慮しなければならない。そのため、体積散乱の特性を正確に記述することは、表面散乱に比べると困難である。実際に、表面散乱のモデルは数多く存在するが、体積散乱を記述したモデルはほとんど存在しない。

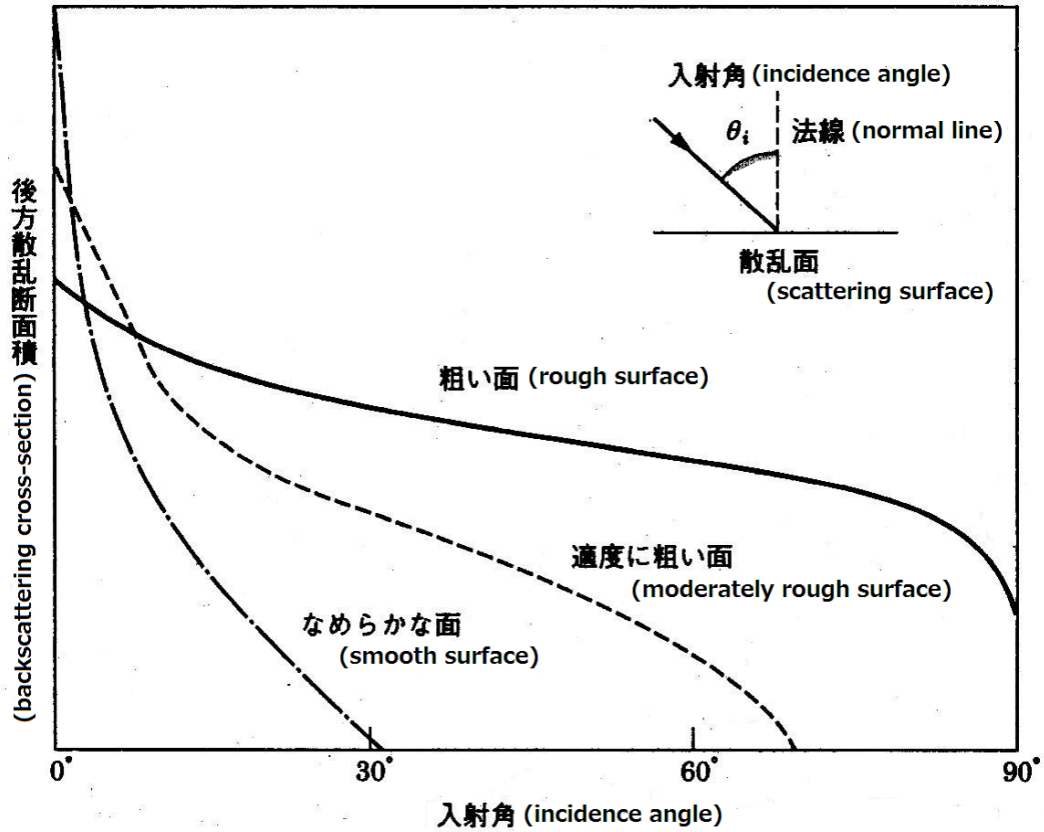


図 2.6: Relation between incidence angle and backscattering cross-section in 3 cases of surface roughness (rough, moderately rough, and smooth surface) [9]

2.2.2 直接波と地表反射波の干渉現象

GPS を用いたリモートセンシングに関する研究の多くは、直接波と地表反射波の間で起こる干渉現象 (図 2.7) を利用している。

まず、直接波と地表反射波の間の位相差 Φ は次の式で表される。

$$\Phi = k\Delta l + \alpha = 2kh \sin \theta + \alpha \quad (2.1)$$

式中の $k(= \frac{2\pi}{\lambda})$ は波数を表している。また、 α は反射による位相変化を表しており、計測対象物の性質や信号の偏波状態などによって異なる。次に、位相差 Φ を用いて地表反射波を定義しなおすと、

$$u_{ref} = u'_{ref} \exp i\Phi(\theta) \quad (2.2)$$

となる。これにより、干渉波の強度 P は、

$$\begin{aligned} P &= |u_{dir} + u_{ref}|^2 \\ &= |u_{dir}|^2 + |u'_{ref}|^2 + 2|u_{dir}^* u'_{ref}| \cos \Phi(\theta) \end{aligned} \quad (2.3)$$

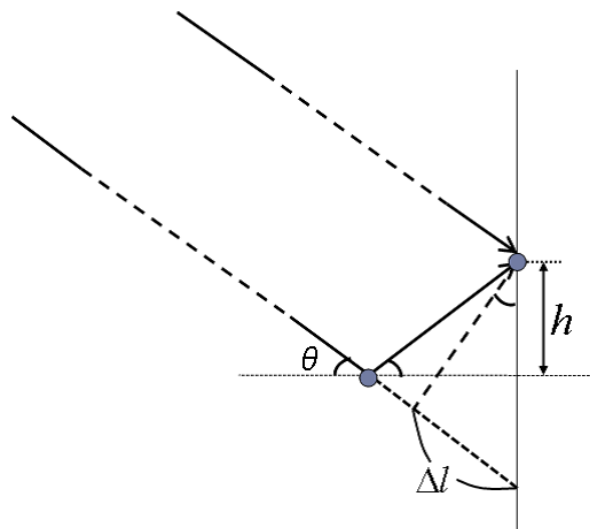


図 2.7: Geometric model of interaction between direct signal and reflected signal

と表現できる。式 (2.3) に \cos 項が含まれているので、干渉波強度は仰角に従って振動をすることがわかる。その様子をグラフで示したものが図 2.8 である。

干渉を用いる手法においては、図 2.8 に示すような強度変動を解析することによって、対象物の特性を取り出す。地表反射波の強度が直接波の強度に近ければ、干渉波振動の振幅が大きくなる。また、直接波と地表反射波の光路差が大きければ、両者の間の位相差が大きくなり、干渉波振動の周期が細くなる。

2.3 研究例

本節では、リモートセンシングの対象例として主要な 4 つの例を取り上げ、それぞれの例に対して、散乱に影響を与えるパラメータなどを詳細に説明する。

2.3.1 海面高度

海面高度を知ることによって、海上の風速の算出、気候変動による海面上昇幅の測定や、気圧の変化の予測、及び津波の予知などに役立てることができる。

海面高度を計測するには、GPS 衛星からの直接波と、海面の反射波との間の遅れ時間（位相差）をパラメータとして利用する [12]。おおまかには、海面が高いほど、アンテナ設置点と海面高度の差が少ないため、直接波と反射波の間の遅れ時間（位相差）は小さくなる。こうした海面高度の計測をする際の配置図を図 2.9 に示す。

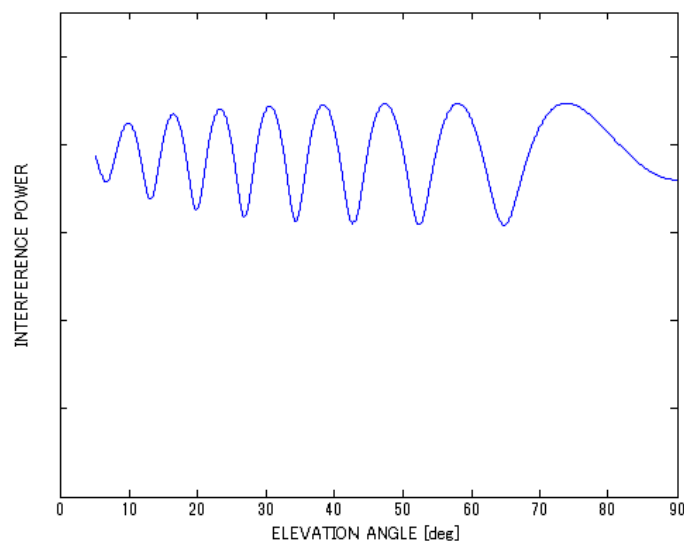


図 2.8: Example of interference pattern

2.3.2 バイオマス

バイオマスとは、単位面積当たりの森林の重量を意味する。バイオマスの値が大きくなるほど、マイクロ波の後方散乱係数が増加するので、受信信号強度から森林量を求めることができる。一般的には、バイオマスと後方散乱係数は図 2.10 のような関係を持つことが知られている。

森林での散乱においては、波長が短いほど、散乱体となる葉のサイズを無視できなくなるため、樹冠で散乱されやすく森林内部には入射しにくい。また、針葉樹、広葉樹などの木の種類や、木の高さによっても散乱量が変化するため、散乱強度から森林のタイプを予測することが可能である [13]。あるいは、GPS が広範囲に及ぶ計測に優れていることを利用し、地球上の各地のバイオマスを得ることができれば、各地の砂漠化の進行度を測ることが可能となる。

2.3.3 海氷

海氷は内部に塩分を含んでおり、この塩分濃度は時が経つにつれて減少する。塩分濃度の値が大きいときは、海氷の導電率が大きくなるので、体積散乱と比較したときの表面散乱の寄与が大きくなる。しかし、年代が経過し、海氷の塩分濃度が小さくなると、反対に体積散乱の寄与が大きくなる。この変化の様子を図 2.11 に示した。

この性質を利用して、GPS 衛星を利用したリモートセンシングによって人の手が届きにくい極寒地域における海氷の年齢や、また流氷の大きさ、位置などを知ることができる。

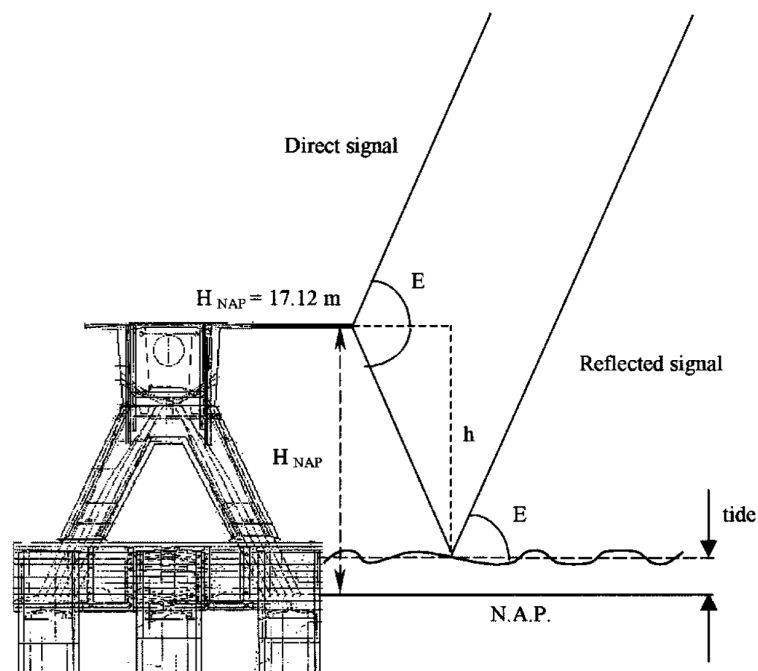


図 2.9: Geometry of direct and reflected signals in the Zeeland Bridge experiment[12]

2.3.4 土壌

土壌の性質は水分量、植生量、あるいは表面のラフネスといった数多くのパラメータが複雑にからみ合って決定される。

それらのパラメータの中でも、例えば、土壌水分の情報を得ることが出来れば、次のような恩恵を得ることができる [3]-[5]。1) 地下水の貯蔵量を知ることができれば、そこから地球上の水の流れを予測して、洪水や干ばつのリスクを軽減することができる。2) 地表面と大気との間における水分の流れを追跡することで、天候や気候の予測が可能である。3) 土壌水分は植物や土中微生物の生育にも関わっているため、土壌水分を調べることによって地球のカーボンサイクルを知ることができる。

また、植生量の変化を記録することができれば、土地ごとの作物収穫量を試算することや、水分と同様にカーボンサイクルを予測することにも役立つ。

土壌水分の計測については、これまでに数々の研究例が報告されており [2]-[6]、GPS 衛星からの直接波と地表反射波の間で起こる干渉を用いた方法が現在の主流である。だが、それらの多くが仮定が少なく済む裸土における計測であり、植生を扱った研究例の数は限られている。

そうした中で、[7] では後述のブリュースタ角に着目した土壌水分測定を行っており、植生のある土壌に対する解決も試みている。しかし、植生を定量的に解析するまでには至っていない。

土壌を対象とした GPS リモートセンシングのこうした動向には、パラメータ分離の困難

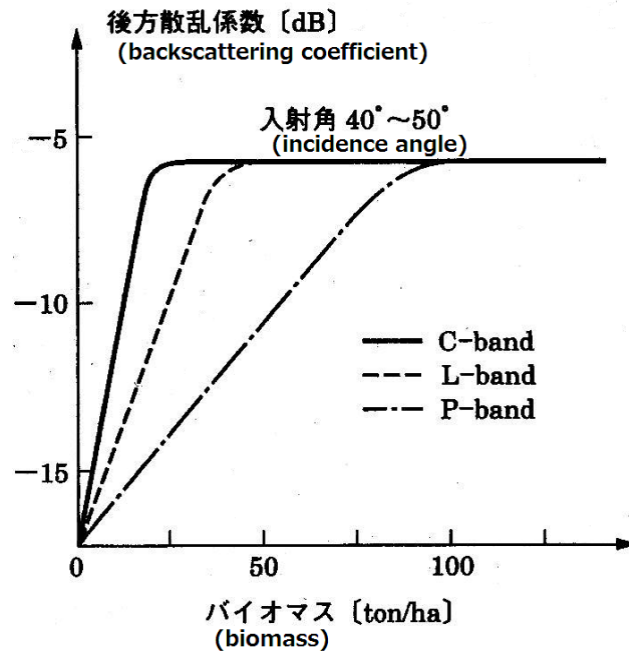
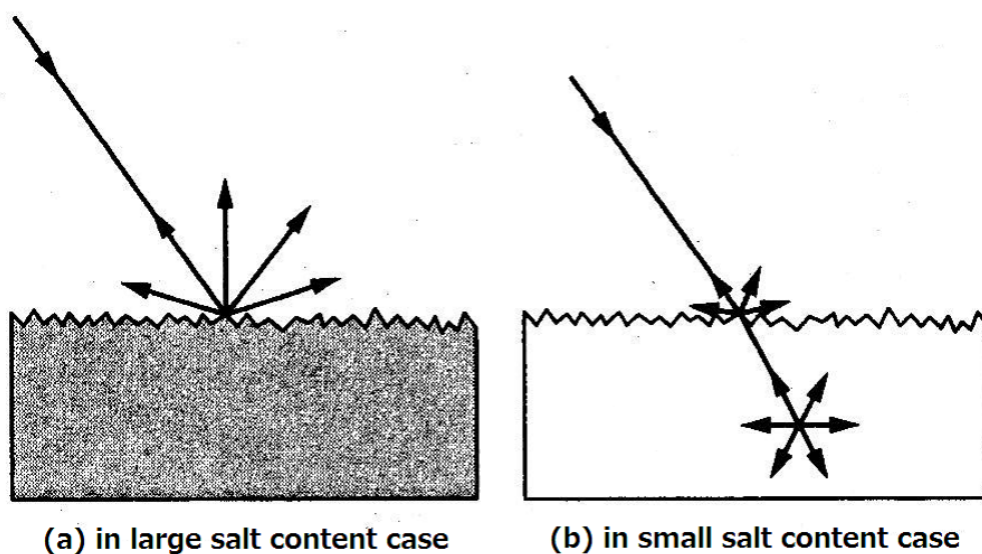


図 2.10: Relationship between biomass and back scattering coefficient [9]

さも起因している。例を挙げると、草が生えていると必ずその下には根があるため、土が盛り上がってラフネスが変化してしまうといったこと、あるいは土壤水分が多いと土がゆるみ、表面がなだらかな状態になりやすくなるといったことである。

また、依存性の問題のほかに、ラフネスが土壤構成物の大きさや構成比率、土壤表面の凹凸の大きさといった多くの要因に基づいて決定されるパラメータであるため、ラフネスの定式化自体が難しいという問題が存在する。

上記のように、土壌を測定対象とした GPS リモートセンシングは、ほかの計測対象と比べると未解決な部分が多く、そのため研究されるべきテーマが多く残されている。本稿では、計測対象を土壌に絞り、次章で詳細を述べることとする。



☒ 2.11: Difference of main contributing scattering method by salt content in the ice. In salty case (a), contribution of surface scattering is much greater than that of volume scattering. But contribution of volume scattering increases by decrease of salinity as case (b) [9]

第3章 GPSリモートセンシングにおける 偏波情報の利用

3.1 干渉波中の土壌水分・植生の特徴量分析に対する偏波情報の利用

前章において、計測対象例の1つとして土壌を取り上げたが、本研究では、センシングの対象物をこの「土壌」に絞って話を進める。前述のとおり、土壌のセンシングは、ほかの測定対象に比べて解決すべき問題点が多く残されているが、その応用範囲は広く、実用的に価値が高い。本研究では、特に需要の高いパラメータである土壌水分と植生が、それぞれ干渉波振動中でどのように観測されるかについて検討し、おのこのパラメータに対応する特徴量を提案する。

土壌水分の抽出に関する研究 [7] では、土壌水分に関して、直接波と地表反射波がつくる干渉波振動のなかに直接現れる特徴量として、ブリュースタ角の存在を挙げている。

また、植生に関しては、本研究では、植生に起因する複数の散乱波に着目し、それらによって干渉波に高周波振動が重畳されることを用いる。

- 土壌水分量：直接波と地表反射波がつくる干渉波振動中のブリュースタ角の位置
- 植生量：干渉波に重畳される高周波振動

図 3.1 に概要を示す。

さらに、偏波情報を用いて2つのパラメータをより明瞭に観測するための手法を提案する。偏波に関する情報は、GPSリモートセンシングの分野では過去にあまり考慮されてきでならず、マイクロ波がもつ偏波の性質を追加情報として用いることは、当該分野において新しい試みである。

偏波情報を利用する場合は、GPS衛星からの送信波がRHCP（右旋円偏波）であることに留意しなければならない。また、電波が有する偏波構造は、誘電体表面における一回の反射によって変化するという点も重要である。誘電体表面において電界の接線方向成分は0でなければならない（境界条件）ため、入射波の水平偏波成分は反射後に位相が逆転する。一方、垂直偏波成分は反射後も位相を保つ。以上を踏まえると、GPS衛星からの直接

3.2 ブリュースタ角と土壌水分量

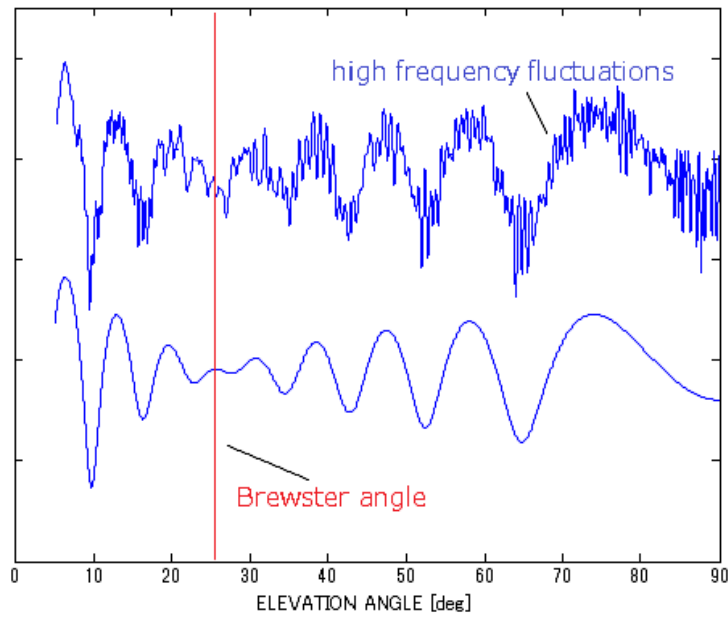


図 3.1: Feature amount of soil moisture and vegetation in interference signal, soil moisture is characterized by Brewster angle, and vegetation is by high-frequency fluctuations

波が RHCP であったとするならば、一回の反射により LHCP（左旋円偏波）に変化し、逆に LHCP は RHCP へ変化する。地表の状態にもよるが、通常、地表反射波のほとんどが一回反射だけの成分であるため、右旋円偏波アンテナよりも左旋円偏波アンテナのほうが、受け取ることができる反射波の総量が多くなる。

また、単に干渉波のパワーに注目しただけでは、直接波や地表反射波に比べて総量の小さい植生散乱波の効果を十分に得ることができない。偏波情報を追加情報として利用すると、今までは観測することが困難であった植生の効果を見られるようになる。

3.2 ブリュースタ角と土壌水分量

土壌水分によって土壌の誘電率が変化し、マイクロ波の反射率が変化する。この反射率は、同じ土壌（誘電率）でも信号の偏波状態によって異なる。以下、誘電率と反射率の関係性を求める。

まず、フレネルの公式によると、垂直偏波成分と水平偏波成分の振幅反射率は、それぞれ以下のように表される。

$$r_v = \frac{n_2 \cos \theta_{inc} - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_{inc} + n_1 \cos \theta_t} = \frac{\tan(\theta_{inc} - \theta_t)}{\tan(\theta_{inc} + \theta_t)} \quad (3.1)$$

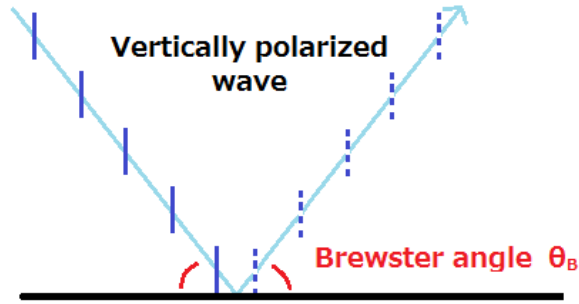


図 3.2: No reflection of vertically polarized wave at Brewster angle

$$r_h = \frac{n_1 \cos \theta_{inc} - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_{inc} + n_2 \cos \theta_t} = \frac{\sin(\theta_{inc} - \theta_t)}{\sin(\theta_{inc} + \theta_t)} \quad (3.2)$$

r_v が垂直偏波成分、 r_h が水平偏波成分の振幅反射率を表している。また、 n_1 が入射側の媒質の屈折率、 n_2 が屈折側の媒質の屈折率、 θ_{inc} が入射角、 θ_t が屈折角をそれぞれ示しており、式中の変形には次のスネルの法則

$$n_1 \sin \theta_{inc} = n_2 \sin \theta_t \quad (3.3)$$

を用いている。

式 (5.1) において、 $\theta_{inc} + \theta_t \rightarrow \frac{\pi}{2}$ のときに $r_v \rightarrow 0$ となることがわかる。この場合の θ_{inc} をブリュースタ角 (Brewster angle) と呼び、ブリュースタ角では垂直偏波の反射がなくなる (図 3.2)。ブリュースタ角 θ_B は、反射境界をなす 2 つの媒質の誘電率に依存し、(5.1) より次のように表される。

$$\theta_B = \arctan \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = \arctan \left(\sqrt{\frac{\mu_{r2} \cdot \epsilon_{r2}}{\mu_{r1} \cdot \epsilon_{r1}}} \right) \quad (3.4)$$

さらに、入射側と屈折側の比透磁率 μ_{r1} と μ_{r2} を 1 とみなし、さらに入射側の媒質を空気 (真空) と仮定すると $\epsilon_{r1} = 1$ となるため、より簡潔に

$$\theta_B = \arctan \sqrt{\epsilon_{r2}} \quad (3.5)$$

と表すことができる。表 3.1 はブリュースタ角の計算例である [7]。

シミュレーションにおいては、まず、土壌水分から誘電率 ϵ_2 を計算することによって、 r_v と r_h を求める。図 3.3 は、一般的な土壌 ($\epsilon_{r2} = 4$) における r_v と r_h の変化の様子を示している。このようにして、偏波ごとに異なる反射率の値を求め、地表反射波の直接波と地表反射波がつくる干渉振動の振幅の変化を予測する。

また、各偏波の反射率は上記のとおりだが、前述のとおり、土壌表面の反射によって位相シフトが起こることも留意しなければならない。具体的には、反射表面の電界の境界条

3.3 干渉波振動中の高周波成分と植生量

表 3.1: Variation of Brewster angle [7]

	SM=0%	SM=20%	SM=40%
ϵ_{r2}	$3.25 + j0.10$	$10.43 + j0.93$	$23.67 + j2.50$
θ_B	61.0°	72.8°	78.4°
θ	29.0°	17.2°	11.6°

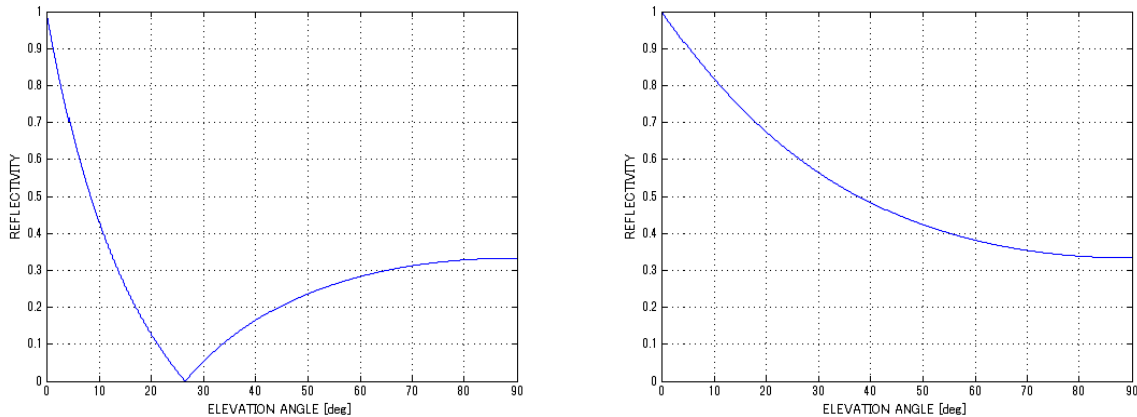


図 3.3: Reflectivity change calculated by the Fresnel equation ($\epsilon_{r2} = 4$), vertically polarized wave (left) and horizontal polarized wave (right)

件に従って水平偏波成分の位相が逆転するため、RHCP が LHCP に、また LHCP が RHCP にそれぞれ変化する。

3.3 干渉波振動中の高周波成分と植生量

植生を観測することを題材とした過去研究の多くは、土壌表面に生える草を土壌表面を覆う層とみなし、送信されたマイクロ波は複数の層からなる誘電体によって反射を受けてアンテナに届くものと捉えている。複数の層をもつ誘電体のいずれかの境界で反射を受けた複数の波と直接波とが、あるいは反射波同士が、互いに干渉して、さまざまな周期が合成された干渉振動を形成することとなる。

しかし、現実の植生は、ほとんどの場合高さが不揃いであり、草が傾きを持っていたり、真上から見た場合に草の生えている場所に隙間が存在することが多いため、植生被覆を層とみなすのは困難であると考えられる。

そこで、本研究では、直接波と地表反射波が作る干渉振動に重畳されている高周波成分に着目し、高周波成分の大きさと植生量との相関関係を調査した。植生を層ではなく、一本一本をある傾きのあるひとつの散乱物とみなし、それによって散乱を受けた個々の散乱

波についてはそれぞれが少しだけ異なる振幅や位相をもった波と捉える。すると、直接波と地表反射波がつくる干渉振動に重畳されるかたちで高周波成分が表れると考えられる。

また、植生散乱波の偏波的性質は、植生のモデルに左右される部分が大きく、一概に記述することはできない。本研究においては、草一本ごとを一本のダイポールアンテナと見なすモデル化を施した（次章参照）。このモデルを用いると、草一本一本は、GPS 衛星からの右旋円偏波を受信し、直線偏波で送信することとなる。送信する直線偏波がいずれの方向に傾いているかは、アンテナすなわち草の傾きに依存する。草が地表に対して垂直に立っているのであれば、その草からの散乱波は純粋な垂直偏波となり、垂直からの傾き角が大きくなるにつれ垂直偏波成分が減少し水平偏波成分が増加する。

3.4 提案手法

前節までにおいて、干渉波振動における土壌水分・植生の効果の表れかたの違いについて説明した。ここで、偏波情報を追加情報として用いることによって、2つの土壌パラメータの効果をさらに効率的に観測することが可能である。

土壌水分による効果を観測するのであれば、フレネルの公式に沿った反射率の効果を純粋に観測できる直線偏波アンテナを用いることが望ましい。さらに言えば、反射率が単調減少となる水平偏波成分よりも、ブリュースタ角付近で低仰角・高仰角双方からの振幅減衰を観測可能な垂直偏波成分のほうが、土壌水分の効果を確認することが容易であると考えられる。そのため、同じ直線偏波アンテナでも、垂直偏波のみを受信するように設置したほうが望ましい。

一方、植生による効果を観測する場合、草一本からの散乱波が直線偏波であるといっても、直線偏波アンテナを用いることは望ましくない。アンテナが受信する電波の総量中で、植生からの散乱波が占める割合は一般にとっても小さく、GPS 衛星からの直接波と地表反射波の届いた分をすべて受信する直線偏波アンテナでは、植生からの散乱波の効果が直接波と地表反射波によって隠されてしまい、干渉波中に現れ出にくくなる。しかし、右旋円偏波アンテナを適用すれば、地表反射波のうち最も多い一回反射成分（RHCP が一回の反射で LHCP となったもの）を受信せず、土壌内部に入り込み体積散乱を受けた多重反射成分しか受信しないため、地表反射波の受信量を大幅に減らすことができる。

ところで、右旋円偏波アンテナを用いて受信する際、草による散乱波成分は、垂直偏波で受信する時と比べて、信号が完全円偏波であれば単純に半減してしまう計算となる。だが、地表反射波のもともとの絶対量が散乱波に比べてはるかに大きいため、地表反射波の成分が減少したことによる影響が強く、結局のところ地表反射波に対する草の散乱波の割合は大きくなると考えられる。

3.4 提案手法

以上より、植生量を観測する場合は、右旋円偏波アンテナを用いて受信することが望ましい。

まとめると

- 土壌水分に対する感度が高いのは垂直偏波アンテナ
- 植生に対する感度が高いのは右旋円偏波アンテナ

と、主とする計測対象に応じて受信アンテナの偏波を使い分けることによって、より明瞭に2つのパラメータを観測できると考えられる。

第4章 シミュレーション

4.1 short wire モデル

干渉波振動中における植生の効果をシミュレーションするにあたって、草のモデル化が必要となる。本研究では、short wire モデル [10] を用いて、草一本をダイポールアンテナによって近似した。

short wire モデルとは、wire 内を流れる電流値が中心からの距離によらず一定とみなすことができる場合に用いられるアンテナモデルの一種である。[10] によると、short wire のポインティングベクトルは次の式で表される。

$$P_{sw} = \frac{Z_0 k^2 I_m^2 L^2 \sin^2 \theta}{32\pi^2 r^2} [W/m^2] \quad (4.1)$$

Z_0 は真空の特性インピーダンスで $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$ を満たす。 k は波数、 I_m は wire を流れる電流の最大値、 L は wire の長さ、 θ は wire のある軸を始線とした散乱角、 r は wire の中心からの距離をそれぞれ表している。また、放射パターンを図 4.1 に示す。

次に、半径 r の球から放出される全電力 W_T を $P_{sw}(r)$ を球の全表面積 S について面積分することによって求めると、次のようになる。

$$\begin{aligned} W_T &= \int_S P_{sw}(r) \cdot ds \\ &= \int_0^\pi P_{sw}(r) \cdot 2\pi r^2 \sin \theta d\theta \\ &= \frac{40\pi^2 I_m^2 L^2}{\lambda^2} [W] \end{aligned} \quad (4.2)$$

なお、式変形の際に、近似値 $Z_0 \approx 120\pi$ を利用している。これを用いると、short wire のゲイン G_{sw} は、

$$\begin{aligned} G_{sw} &= \frac{P_{sw}}{\text{(等方アンテナの電力密度)}} \\ &= \frac{\frac{Z_0 k^2 I_m^2 L^2 \sin^2 \theta}{32\pi^2 r^2}}{\frac{W_T}{4\pi r^2}} \\ &= \frac{3}{2} \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (4.3)$$

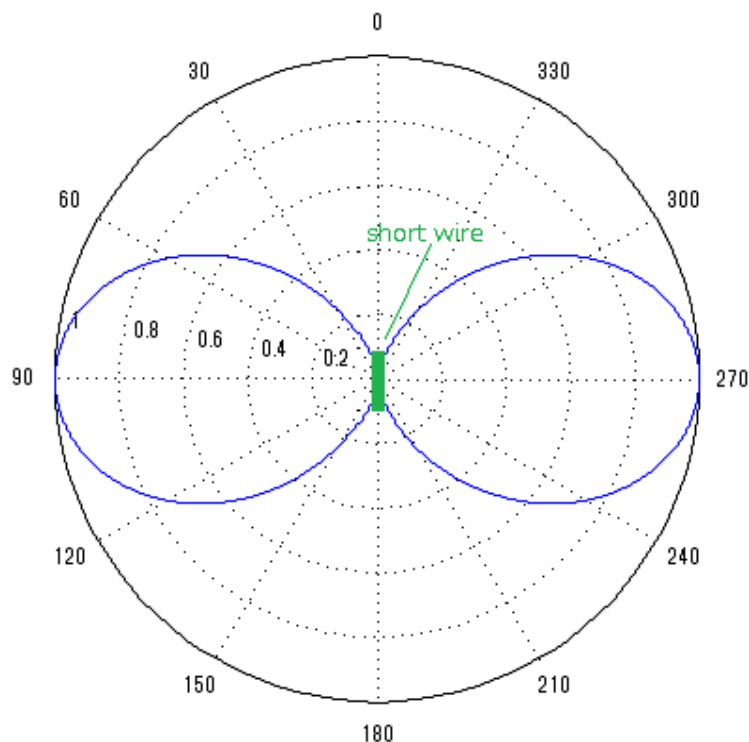


図 4.1: Polar pattern in short wire model

と表される。また、フリスの伝達公式を用いて、short wire の実効断面積 A_{sw} は、次のように表される。

$$\begin{aligned}
 A_{sw} &= \frac{\lambda^2 G_{sw}}{4\pi} \\
 &= \frac{3\lambda^2 \sin^2 \theta}{8\pi} [m^2]
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

実際のシミュレーションにおいては、アンテナ付近で、ある広さを定め、その範囲内に存在する草の本数を設定する。そして、おのおのの草について、散乱点となる高さや草の傾き角を無作為に決定する。

4.2 受信電波の各成分の記述

アンテナが受信する全マイクロ波は、次の3つの成分から構成される。

- GPS 衛星からの直接波
- 地表反射波
- 植生による散乱波

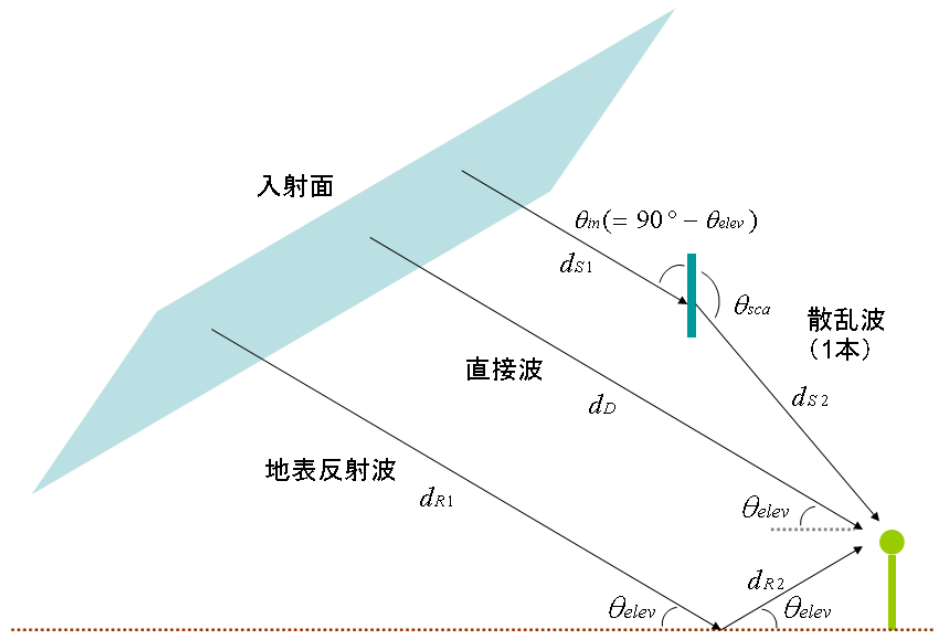


図 4.2: Configuration of simulating received signals by the antenna

このうち、直接波と地表反射波の干渉によって周期の大きな干渉波が生じる。また、植生による散乱波が、直接波や地表反射波と、あるいはお互いに干渉することで高周波成分を生じる。

以下では、各成分の電圧変化を式で表現する。

直接波

GPS 衛星から届くマイクロ波の電力密度を $F[W/m^2]$ とおく。また、受信アンテナのゲインを $G_{ant}[m^2]$ とする。受信全電力はこれらの積 $FG_{ant}[W]$ と表される。この受信電力と、空間インピーダンス Z_0 を用いて、受信電圧の振幅を表現すると $\sqrt{Z_0FG_{ant}}[V]$ となる。

また、図 4.2 のように、GPS 衛星の入射方向と直角する入射面を決め、その面とアンテナまでの距離を d_D とおくと、直接波の位相は e^{ikd_D} となる。

地表反射波

直接波のときと同様に、GPS 衛星から届くマイクロ波の電力密度を $F[W/m^2]$ とおく。この値は、GPS 衛星が十分遠方にあると考えれば、直接波で用いた値とほぼ等しいものとみなしてよい。フレネルの公式によって求められる振幅反射率を r とすると、アンテナに届く電

4.3 シミュレーションの結果

力密度は $Fr^2[W/m^2]$ となる。受信電力はこれにアンテナゲインをかけ合わせた $FR^2G_{ant}[W]$ と表されるので、受信電圧の振幅は $r\sqrt{Z_0FG_{ant}}[V]$ と計算される。

また、直接波の位相を求める際に決めた入射面と地表反射点との距離を d_{R1} 、地表反射点とアンテナとの距離を d_{R2} とおくと、地表反射波の位相はそれらの和を用いて $e^{ik(d_{R1}+d_{R2})}$ と表される。

1 本の草からの散乱波

これまでと同様に、GPS 衛星から届くマイクロ波の電力密度として $F[W/m^2]$ を用いると、short wire の実効断面積 $A_{sw}(\theta_{in})[m^2]$ を乗じることにより、草 1 本の受信電力は $FA_{sw}(\theta_{in})[W]$ と表される。なお、 θ_{in} は short wire に入射するマイクロ波の入射角である。この受信電力を受けて short wire はゲイン $G_{sw}(\theta_{sca})$ に従ってマイクロ波を再放射し、散乱点からの距離が d_{S2} である受信アンテナに到達する。 θ_{sca} は short wire から再放射されるマイクロ波の散乱角である。このときアンテナに届く電力密度は、 $FA_{sw}(\theta_{in})[W]$ に $\frac{G_{sw}(\theta_{sca})}{4\pi d_{S2}^2}[1/m^2]$ をかけ合わせた $\frac{FA_{sw}(\theta_{in})G_{sw}(\theta_{sca})}{4\pi d_{S2}^2}[W/m^2]$ と表される。よって、受信電圧の振幅は $\sqrt{Z_0 \frac{FA_{sw}(\theta_{in})G_{sw}(\theta_{sca})}{4\pi d_{S2}^2}}G_{ant}[V]$ となる。

散乱波についても、これまでの同様にして位相を求める。直接波の位相を求める際に決めた入射面と散乱点との距離を d_{S1} 、散乱点とアンテナとの距離を d_{S2} とおくと、散乱波の位相はそれらの和を用いて $e^{ik(d_{S1}+d_{S2})}$ と表される。

4.3 シミュレーションの結果

本節では、3章で述べた提案手法に基づいてシミュレーションを行った結果を報告する。シミュレーションは、以下の2つのテーマに着目して行い、評価した。

1. 植生つき土壌における土壌水分量の判別（垂直偏波アンテナ）
2. 植生量の判別（右旋円偏波アンテナ）

4.3.1 植生のある土壌における土壌水分量の判別（垂直偏波アンテナ）

植生のあるなしにかかわらず、プリユースタ角の位置を確認することが出来るかについて評価する。プリユースタ角の効果を十分に得られるよう、受信アンテナが受け取る偏波を垂直偏波に設定した。シミュレーションの結果を図 4.3 に示す。

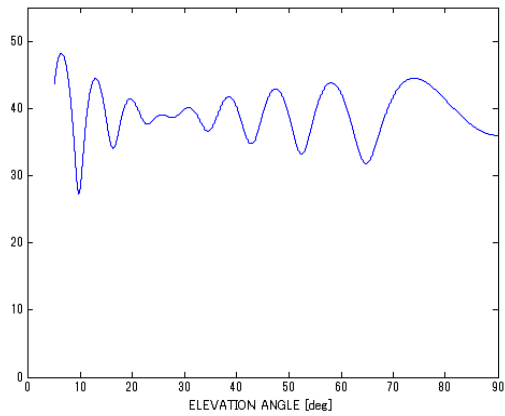
植生がない場合 (a)(b) はもちろんのこと、植生がある場合 (c)(d) においても、大きな周期の干渉振動波中のブリュースタ角に注目することによって、土壌水分による違いを観測することが可能であることを確認できる。

また、逆に、ブリュースタ角の位置が変化しても、植生の効果に起因する高周波成分に注目することによって、干渉波振動が植生によって受ける影響を観測することが可能であることも確認できた。

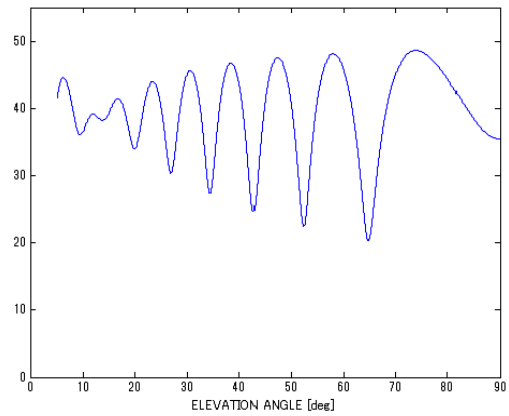
4.3.2 植生量の判別（右旋円偏波アンテナ）

本節では、植生だけに重点を置き、受信アンテナの偏波を植生に対する感度が高い右旋円偏波に設定して、植生の量による違いを観測することができるかどうか評価する。草の本数を変えたシミュレーションの結果を図 4.4 に示す。このように、草の本数に従った高周波成分の強弱を観測することができる。

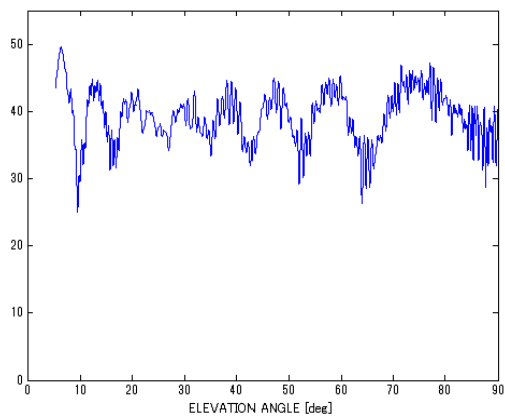
4.3 シミュレーションの結果



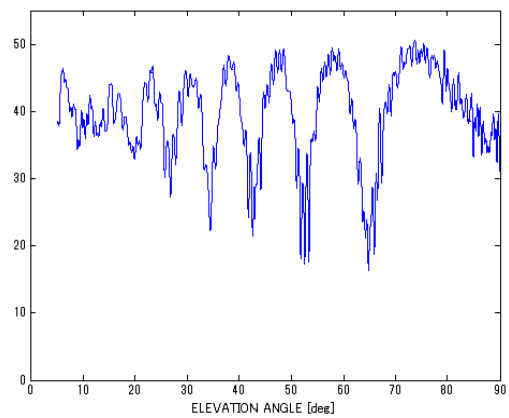
(a) $\epsilon_{r2} = 4$, the number of vegetation = 0



(b) $\epsilon_{r2} = 20$, the number of vegetation = 0

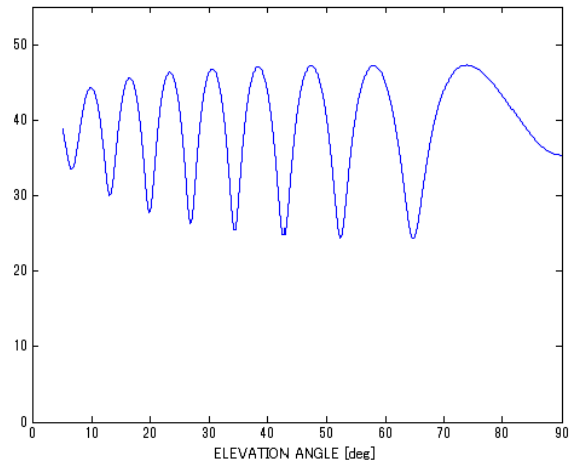


(c) $\epsilon_{r2} = 4$, the number of vegetation = 100

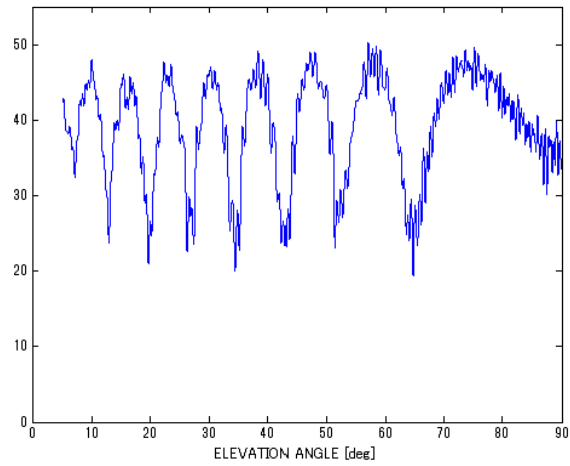


(d) $\epsilon_{r2} = 20$, the number of vegetation = 100

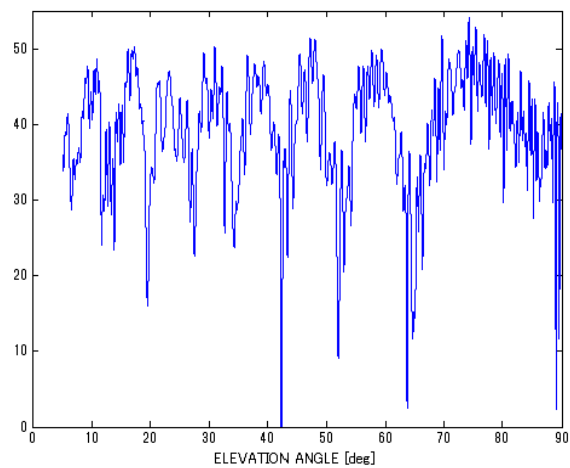
☒ 4.3: Simulated interference power, with dielectric constant of soil ϵ_{r2} or vegetation amount changed



(a) the number of grasses = 0



(b) the number of grasses = 100



(c) the number of grasses = 500

図 4.4: Simulated interference pattern, with vegetation condition changed

第5章 実験

5章で述べたパラメータ分離の実現可能性と、6章で述べたシミュレーションの妥当性を確かめるため、屋外で実験をおこなった。実験は、シミュレーションの章で設定したものと同じ2つのテーマに注目し、テーマに応じて受信アンテナが受け取る偏波の種類を使い分けた。

1. 植生つき土壌における土壌水分量の判別（垂直偏波アンテナ）
2. 植生量の判別（右旋円偏波アンテナ）

すべてのアンテナは、受信機 (EVK-5H, u-blox, 図 5.1) を通して計算機に接続され、受信機から読み込んだデータを計算機上に保存していく。アンテナの高さにより、直接波と地表反射波の間の干渉波振動（主振動）の周期が決定する。式 (4.1) において、位相差 Φ が1周 (2π) すると1周期となるので、1周期分に対応する仰角変化 θ_{pitch} は、

$$\theta_{pitch} = \arcsin \frac{\pi}{kh} = \arcsin \frac{\lambda}{2h} \quad (5.1)$$

となる。1周期の間隔が短いほど、同じ測定時間内で得られる干渉振動の山の数は多くなるため、干渉波振動の振幅変化を観測しやすくなるという利点がある。逆に、1周期の間隔が長いと、同じ測定時間内で上下の変動が少なくなるということを意味するので、ブリュースタ角の位置がわかりにくくなる可能性が高まるが、本研究のように直接波と地表反射波がつくる干渉振動内の高周波成分に着目する場合は、高周波成分を観測しやすくなるという利点を得られる。今回は、すべての実験でアンテナ高は 84cm とし、適度な間隔の周期 $\arcsin \frac{19[cm]}{2 * 84[cm]} = 6.5[deg]$ を用いることとした。

実験は、地面が平らで視界が開けており、可能な限り障害物の少ない場所を選んで行った。障害物が多いと、正確な観測をする上で妨害となるマルチパスを受信する可能性が高まるからである。また、実験前に、GPS 衛星の軌道予測ソフト (Planning, Trimble) を用いて、便が良い時間帯に日本上空を飛行する衛星を選ぶ (図 5.2)。



図 5.1: GPS signals receiver (EVK-5H, u-blox)

5.1 植生のある土壌における土壌水分量の判別（垂直偏波アンテナ）

前述のとおり、直接波と地表反射波がつくる干渉振動において、土壌水分量はブリュースタ角として、植生量は高周波成分として、それぞれ現れることが考えられる。本節で扱う実験は、この仮説の実証を行うことが目的である。

実験に用いる受信アンテナの偏波は垂直偏波を選択した（図 5.3）。これは、土壌水分の効果を強く表出させるためである。測定場所としては、広く視界の開けている多摩川河川敷を選択した。データ比較のために、土壌水分の多い環境と少ない環境を用意して測定を行ったが、実際のところ、土壌水分以外のパラメータを変えずに土壌水分をコントロールすることは非常に難しく、水分の多い場所と少ない場所でも、実値で 20% 以上の差をつけることはできなかった。上記の理由から、土壌水分による少ない差異を多く表出させるために、土壌水分の効果を観測しやすい垂直偏波アンテナを選択した。

また、垂直偏波アンテナを用いて受信する場合、前述のとおり地表反射成分を多く受け取るため、植生に対する感度が相対的に小さくなる。このため、植生の観測については、単純に植生被覆があるか無いかの比較のみを行う。なお、植生量による違いを評価するための実験は、次の節で述べる別の実験で扱うこととする。

植生のない場所、ある場所として選んだ場所で撮影した観測の様子をそれぞれ図 5.4 と図 5.5 に示す。図 5.5 の場所に生えている植生を拡大した写真が図 5.6 である。これらの場所に、それぞれ水を撒かない部分と撒いた部分を作り、植生の有無と水分の量を変えた計 4 箇所の測定環境を用意した。

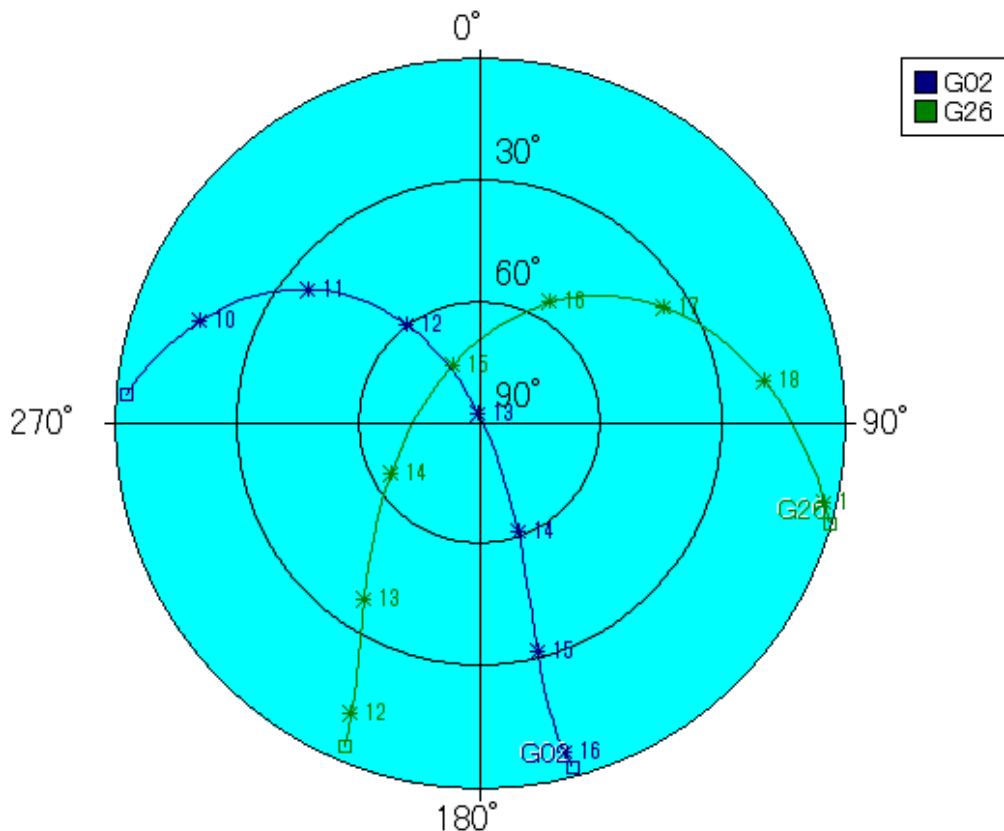


図 5.2: Tracking GPS satellites by Planning (Trimble)

水分量に着目した比較

まずは、植生の無い土壌における土壌水分の見え方の違いを検証する。図 5.8 の (a) が土壌水分の少ない場合、(b) が多い場合の干渉波振動の実測値である。また、垂直偏波の振幅反射率が仰角変化する様子を図 5.7 に示す。反射率が大きい仰角範囲において干渉波振動の振幅が大きくなっていることや、反射率が 0 となるブリュースタ角に近づくにつれて振幅が減衰していることがうかがえる。このことは、植生の無い土壌において、土壌水分による効果を観測できていることを意味する。

次に、植生がある土壌での土壌水分の見え方の違いについても検証する。図 5.8 の (c) が土壌水分の少ない場合、(d) が多い場合の干渉波振動の実測値である。植生のある土壌では、植生のない土壌に比べ、水分量の違いによるブリュースタ角の移動が少ない。これは、土壌水分に混ざって植生がもつ水分が影響しているのではないかと考えられる。例えば植生が枯れていて水分をほとんど持たない場合、土壌水分を減らす方向に作用が働いてしまうと予想される。しかし、植生の枯れ具合を制御することは、植生を手元で管理できる環境がない限り、困難である。

また、植生の有無にかかわらず、高仰角の領域において、水分の多い場合のほうが干渉波振動の振幅が大きいこともわかる。これは、図 5.7 の反射率変動に合う結果である。



図 5.3: Dipole antenna (vertically set to surface at experiment)



図 5.4: Experiment setup in the bare soil field (Tamagawa riverside)

植生量に着目した比較

植生量による見え方の違いがあるか検証する。図 5.8 の上段 (a)(c) が植生のない場合、下段 (b)(d) が植生のある場合である。また、それぞれを拡大したグラフを図 5.9 に示す。植生のある場合の拡大図において、植生のない場合に比べ高周波成分が密であることが、およそわかる。なお、植生あるなしにかかわらず、もとのっていた揺らぎ（地表のラフネスなどに起因）が植生効果によって打ち消されてしまう場合も考えうるため、高周波振動の振幅に注目することはあまり望ましくないと考えられる。

しかし、前述のとおり、当測定では垂直偏波アンテナを用いて受信しているため、全受信波に対する植生散乱波の割合が少なく、目視で植生に効果による違いを確認することは難しい。そこで、次節では、植生の効果をより明瞭にして、定量的な検証を行う。



図 5.5: Experiment setup in the vegetated field (Tamagawa riverside)



図 5.6: Grasses on vegetation field at 10-15cm height (Tamagawa riverside)

5.2 植生量の判別（右旋円偏波アンテナ）

前節において、土壌水分の効果が強く現れる垂直偏波アンテナを用いて、植生被覆の有無にかかわらず、ブリュースタ角に注目することによって、土壌水分を見分けることが可能であることを示した。本節では、植生だけに重点を置き、垂直偏波アンテナに比べ植生の効果を多く得られる右旋円偏波アンテナを用いて、植生の量を観測することができるか実証する。

当実験で用いた右旋円偏波アンテナ (ANN-MS-0-005, u-blox) を図 5.10 に示す。3章で述べたとおり、右旋円偏波アンテナを用いて受信すると、全地表反射波のうち最も信号強度の大きい一回地表反射波を無視することになるため、全受信波に対する植生散乱波の成分が相対的に増加する。

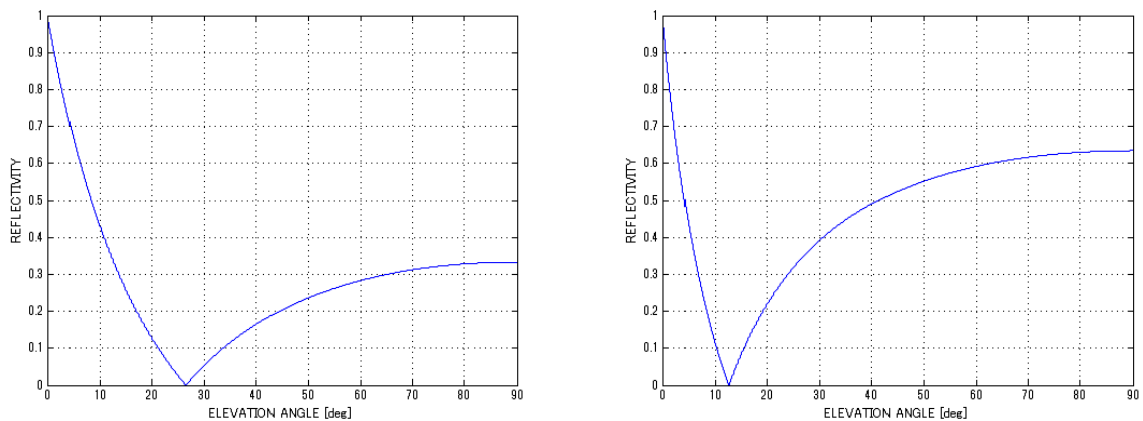


図 5.7: Reflectivity value of reflecting surface, dry soil case ($\epsilon_{r2} = 4$) and wet soil case ($\epsilon_{r2} = 20$)

測定場所として、植生のない土壌には前節に引き続き図 5.4 のグラウンドを用いた。それに加え、鶴見川の河川敷を選択し、アンテナの高さを超えない適度な背丈の草 (~40cm) が密集している場所を選定した。植生の違いによる干渉波振動の差異を観測するため、ある部分の草を家庭菜園用の道具を用いて数を減らし、草の多い場所と少ない場所を用意した。これらの場所で撮影した写真をそれぞれ図 5.11 と 5.12 に示す。

右旋円偏波アンテナによる干渉波振動の観測結果を図 5.13 に示す。おおよそではあるが、草の量によって高周波振動の粗密が変化していることが見た目にもわかる。本節では、これらの違いに対して定量的な分析を行うため、FFT によるスペクトル解析を用いた。

まず、図 5.13(a) のデータに対し、全仰角領域にわたって FFT 処理を施した結果を図 5.14 に示す。下段のグラフは、上段のグラフの一部を拡大表示したものである。今回の FFT においては、 $1\text{ms} = 1\text{deg}$ に対応するようにサンプリング周波数を定めている。本実験で用いたアンテナの高さが 84cm で、直接波と地表反射波がつくる干渉振動の周期は 6.5deg であった。よって、直接波と地表反射波がつくる干渉振動によるスペクトルは $\frac{1}{6.5 \times 10^{-3}} = 153.8[\text{Hz}]$ にピークをもつこととなる。だが、実際のところは、体積散乱による複雑な位相変化が原因となって周期が乱されてしまうことが多く、図 5.14 において、理論値 153.8Hz の前後にピークがいくつもあるのはそのためであると考えられる。

本研究では、植生によって生じる高周波成分を 0.5deg 以下の周期をもつ振動と捉える。今回、周期の大きい干渉波振動が 6.5deg の周期をもっているが、おおよそ 10% 以下の周期をもつ振動を高周波とした。閾値を 0.5deg と決めたため、植生効果の大小を比較するためには、 $\frac{1}{0.5 \times 10^{-3}} = 2000[\text{Hz}]$ 以上の領域のスペクトルを調べなければならない。

また、植生被覆を形成する草の多くが垂直に立っていると仮定すると、マイクロ波が低仰角で入射した場合のほうが、草の実効断面積が大きくなる。この仰角依存性を検証するために、 $10 \sim 20[\text{deg}] / 35 \sim 45[\text{deg}] / 60 \sim 70[\text{deg}]$ という 3 つの仰角領域ごとに、2000Hz

5.2 植生量の判別（右旋円偏波アンテナ）

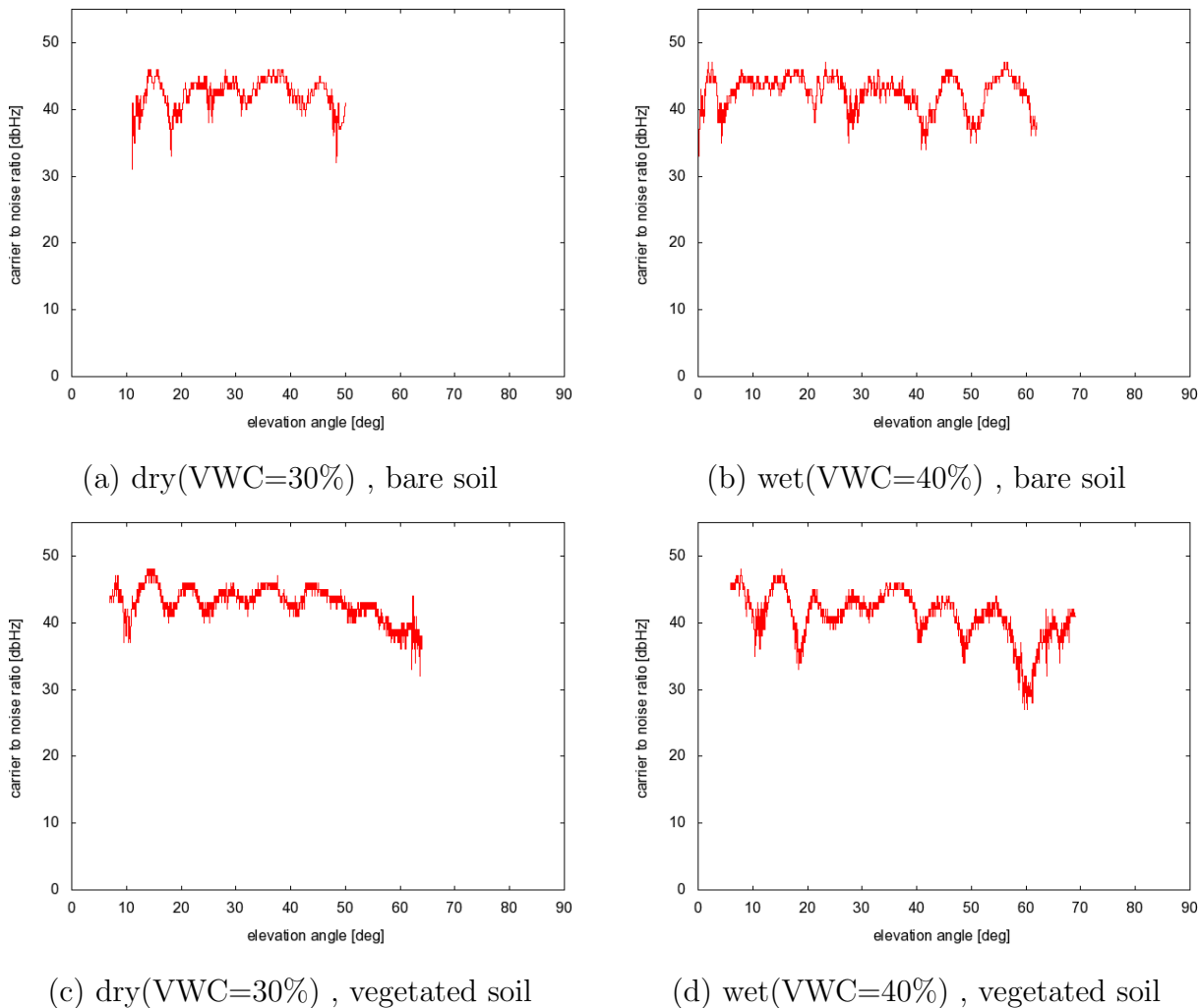


図 5.8: Raw data of interference power by ground experiments, with VWC(Volumetric Water Content) or vegetation condition changed

以上のスペクトルパワーを合算した結果を表 5.1 に示す。

10 ~ 20[deg] の低仰角領域では、草が多いほど高周波成分が増えるという理論通りの結果が得られた。しかし、仰角の高い領域ではその動向がみられなかった。実際の測定では、GPS 衛星の仰角や方位角の変化に従って、送信マイクロ波が到達する草の位置や数が変わることがあるため、仰角依存性が見えづらくなるという可能性がある。今回の観測地でも、草の生え方は必ずしも均一ではなかったため、植生効果の仰角依存性が薄まってしまったものと考えられる。

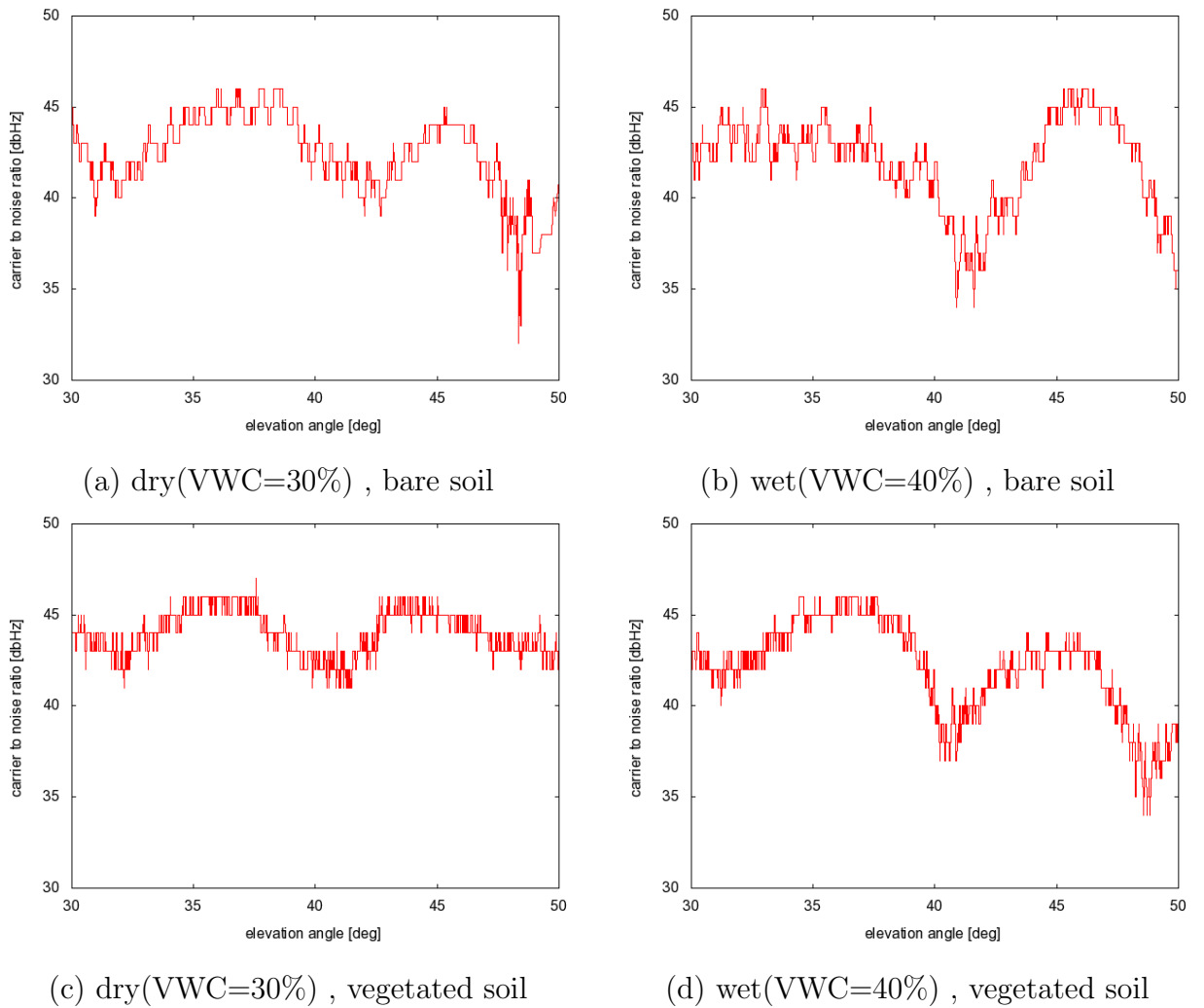


図 5.9: Part of raw data of Fig.5.8 (by elevation angle from 30 to 50)



図 5.10: RHCP antenna

5.2 植生量の判別（右旋円偏波アンテナ）

表 5.1: Total power of high frequency (>2000Hz) spectrum

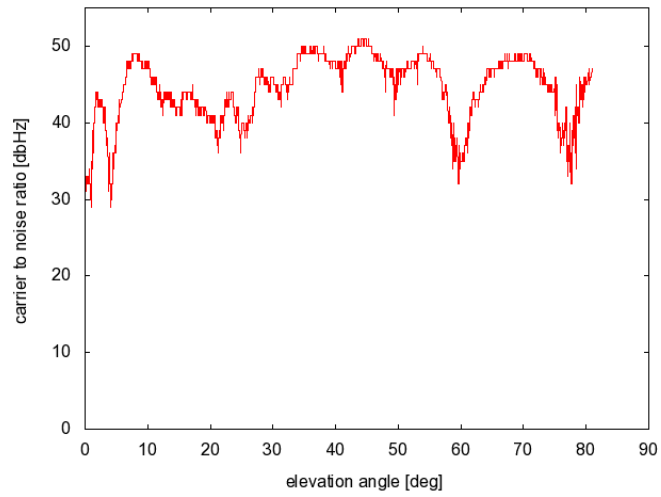
	10 ~ 20[deg]	35 ~ 45[deg]	60 ~ 70[deg]
裸土	22.8	17.6	30.6
草の少ない土	29.8	46.3	19.6
草の多い土	37.3	38.3	36.4



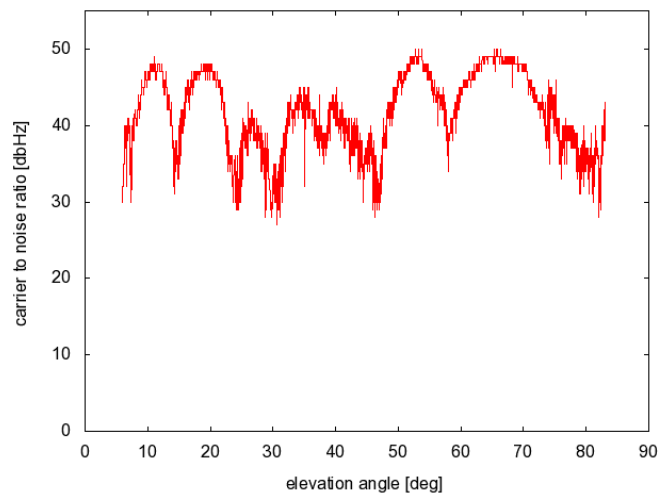
図 5.11: Much vegetated surface (Tsurumi riverside)



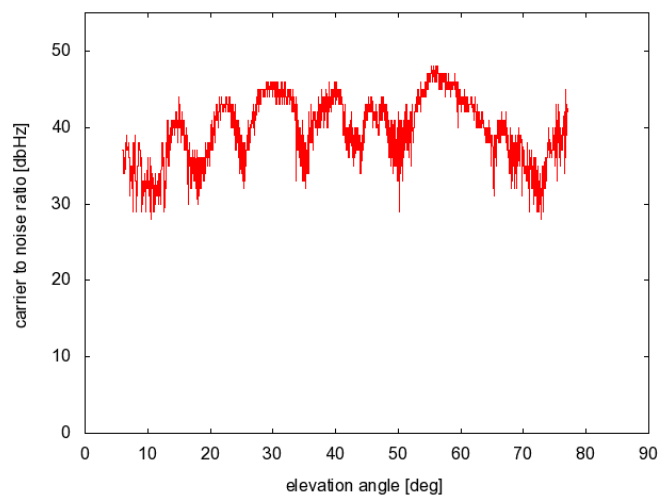
図 5.12: Little vegetated surface (Tsurumi riverside)



(a) bare soil



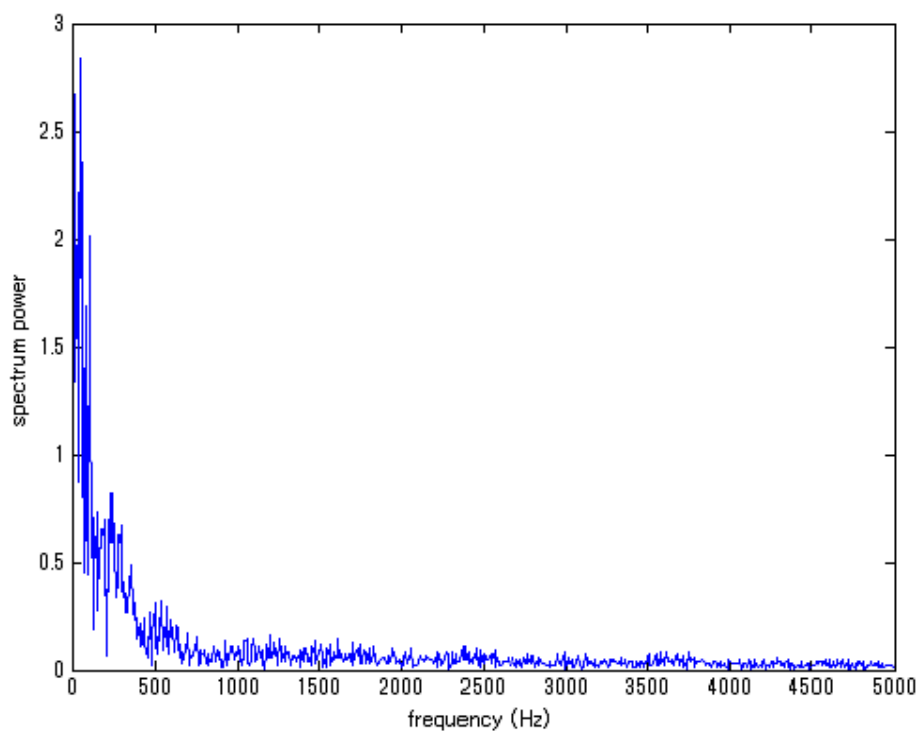
(b) little vegetated soil



(c) much vegetated soil

☒ 5.13: Raw data of interference pattern, with vegetation condition changed

5.2 植生量の判別（右旋円偏波アンテナ）



↓ zoom in ($\sim 500Hz$)

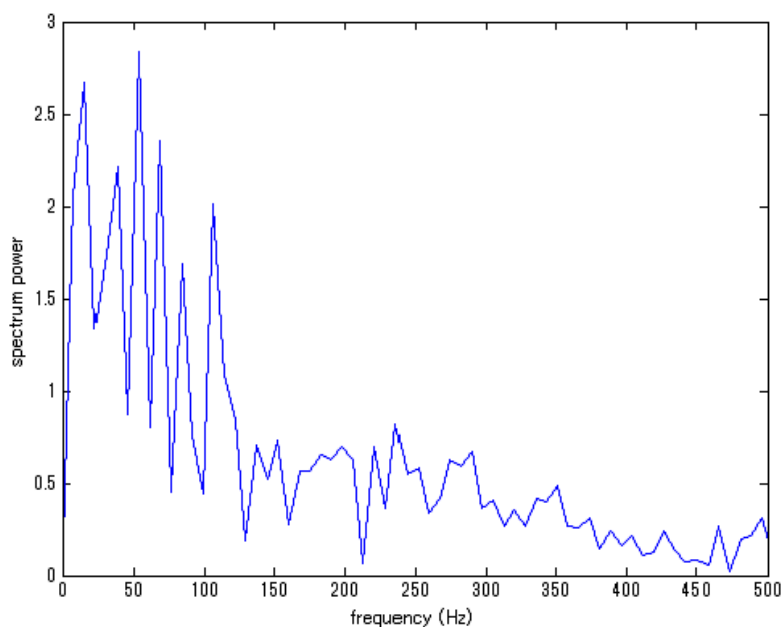


図 5.14: Spectrum power of the interference signal of Fig.5.13 (a)

第6章 むすび

6.1 まとめ

本稿では、GPS を利用したリモートセンシング技術について述べ、当該技術の有効性について評価を行った。

まず、第2章で、GPS リモートセンシングを扱う多くの研究で採用されている干渉を用いた方法について、基本的な原理や応用例を説明し、当該分野の研究動向について述べた。具体的には、土壌の測定に関する多くの研究においては、仮定が少なく済む裸土の場合しか扱っていないこと、あるいは偏波に関する情報が十分に用いられていないことを挙げた。

第3章では、土壌水分と植生がそれぞれ干渉振動に与える効果を説明し、直接波と地表反射波がつくる干渉波振動中で観測可能な特徴量を提案した。また、偏波情報を用いて、土壌水分や植生の効果をより明瞭に観測するための手法を提案した。

次に、第3章で述べた提案手法の有効性を確かめるため、シミュレーションと実験を行った。

第4章では、シミュレーションのために、土壌表面の植生をモデル化し、アンテナ上で干渉するマイクロ波の各成分を記述した。そして、2つのテーマに沿ってシミュレーションを行った。1つ目に、植生が存在しても土壌水分の効果（プリュースタ角の効果）を観測できるか、あるいは逆に、土壌水分が変化しても植生の効果（高周波成分）を観測できるか、ということについて評価を行った。

第5章では、シミュレーションと同様の2つの観点から実施した実験について報告した。1つ目の観点として、土壌水分の効果が干渉振動に強く表れる垂直偏波アンテナを用いて、植生がある土壌においても水分の違いが観測できるかどうかについて評価した。測定の結果、シミュレーションに沿ったプリュースタ角を観測することができ、植生がある土壌でも水分の効果が得られることを確認した。次に、2つ目の観点として、植生量の効果が干渉振動に強く表れる右旋円偏波アンテナを用いて、植生量による違いを評価するための実験を行った。また、定量的な解析をするために、FFTによるスペクトル分析を導入した。測定の結果、植生量が増加するほど高周波成分がおおよそ大きくなっていることを確認した。

6.2 今後の発展

まだ研究事例は少ないものの、干渉現象ではなく反射波の偏波解析を利用した方法がある。この方法を用いると、直接波と反射波を双方を受信して干渉を起こす必要はなく、反射波の信号強度の測定だけで対象物の特性を推測することが可能である。

具体的には、6つの異なる偏波（水平偏波、垂直偏波、45deg 偏波、135deg 偏波、RHCP 偏波、LHCP 偏波）について、それぞれの反射波強度を測定し、ストークスパラメータを計算する。その算出したストークスパラメータを用いて、受信波の偏波状態を決定する各パラメータ（傾き角、膨らみ角、軸比）を特定する。偏波状態を表す各特徴量が、対象物による反射によってどの程度変化したのかを対象物の特性を表す指標として用いる。また、偏波の位相がどれだけそろっているかを示す DOP(Degree of Polarization) という指標も用いられる。DOP もストークスパラメータを用いて求めることができる。

測定対象物が、位相変化に対する感度が大きいタイプのものであれば、こちらの偏波解析を用いる方法のほうが有効である。マイクロ波が植生によって散乱を受けると、位相が乱され、インコヒーレント成分が増加する。その増加幅は植生の量に依存するため、DOP と植生が相関関係をもつ。実際のところ、植生量については、干渉波強度の測定では感度が小さいため、こちらの偏波解析を用いた方法が有利であると考えられる。

ただし、反射波のみの強度を用いるということは、より厳密な強度測定が求められるということを意味している。さらに、反射波以外を受信しないようにゲインの大きなアンテナを導入する必要もあり、干渉波の測定に比べ、測定に要するコストが高いという欠点も有する。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、御協力を頂いた皆様に対し、この場を借りて感謝の言葉を申し上げます。

宇宙航空研究開発機構 齋藤宏文教授、福田盛介准教授には、研究に対する取り組み姿勢、屋外実験の実施方法、発表論文を執筆する上でのアドバイスなど、厳しくも温かいさまざまなご指導を頂きました。厚く御礼申し上げます。

東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻 齋藤宏文研究室の皆様には、研究を進める上で、多くの助けを頂きました。

以上の方々を始め、本論文の執筆に際してご支援を頂いたすべての方々に、深く感謝いたします。

発表文献

- (1) 加藤竜太, 齋藤宏文, 福田盛介: 「GPS 信号地表反射波の偏波特性を利用したリモートセンシングの実験的評価」, 信学技報, vol.111, No.52, SANE2011-14, pp.25-30, May, 2011.
- (2) R.Kato, H.Saito and S.Fukuda , "Experimental study for GNSS-R polarimetry", *2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp.2853-2856, Vancouver, Canada, July 24-29, 2011.

参 考 文 献

- [1] K.M.Larson, J.J.Braun, E.E.Small, V.U.Zavorotny, E.D.Gutmann, and A.L.bilich, "GPS Multipath and Its Relation to Near-Surface Soil Moisture Content", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol.3, pp.91-99, March, 2010.
- [2] V.U.Zavorotny, K.M.Larson, J.J.Braun, E.E.Small, E.D.Gutmann and A.L.Bilich, "A Physical Model for GPS Multipath Caused by Land Reflections: Toward Bare Soil Moisture Retrievals", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol.3, pp.100-110, 2010.
- [3] K.M.Larson, E.E.Small, E.D.Gutmann, A.L.Bilich, J.J.Braun, and V.U.Zavorotny, "Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies", *Geophysical Research Letters*, vol.35, L24405, 2008.
- [4] D.Masters, P.Axelrad and S.Katzberg, "Initial results of land-reflected GPS bistatic radar measurements in SMEX02", *Remote Sensing of Environment*, vol.92, pp507-520, 2004.
- [5] Q.Li, S.Reboul, and A.Gardel, "Beach soil moisture measurement with a land reflected GPS bistatic radar technique", *New Trends for Environmental Monitoring Using Passive Systems*, pp.1-6, 2008.
- [6] N.Rodriguez-Alvarez, X.Bosch-Lluis, R.Acevo, A.Aguasca, A.Camps, M.Vall-llossera, I.Ramos-Perez and E.Valencia, "Study of maize plants effects in the retrieval of soil moisture using the interference pattern GNSS-R technique", *2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp.3813-3816, Honolulu, HI, USA, July 25-30, 2010.
- [7] N.Rodriguez-Alvarez, A.Camps, M.Vall-llossera, X.Bosch-Lluis, A.Monerris, I.Ramos-Perez, E.Valencia, J.F.Martinez-Fernandez, G.Baroncini-Turricchia, C.Pérez-Gutiérrez and N.Sánchez, "Land Geophysical Parameters Retrieval Using the

- Interference Pattern GNSS-R Technique”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.49, pp.71-84, January, 2011.
- [8] N.Rodriguez-Alvarez, X.Bosch-Lluis, A.Camps, M.Vall-llossera, E.Valencia, J.F.Marchan-Hernandez and I.Ramos-Perez, ”Soil Moisture Retrieval Using GNSS-R Techniques: Experimental Results Over a Bare Soil Field”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.47, pp.3616-2624, November, 2009.
- [9] 大内和夫, ”リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎 (第2版)”, 東京電機大学出版局, 2009.
- [10] Edward A. Wolff, ”ANTENNA ANALYSIS”, Artech House, 1988.
- [11] Q.Li, S.Reboul, and A.Gardel, ”Beach soil moisture measurement with a land reflected GPS bistatic radar technique”, *New Trends for Environmental Monitoring Using Passive Systems*, pp.1-6, 2008.
- [12] M.Martin-Neira, M.Caparrini, J.Font-Rossello, S.Lannelongue, and C.S.Vallmitjana, ”The PARIS Concept: An Experimental Demonstration of Sea Surface Altimetry Using GPS Reflected Signals”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.39, pp.142-150, 2001.
- [13] Y.Kim, J.V.Zyl, ”Comparison of Forest Parameter Estimation Techniques Using SAR Data”, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol.3, pp.1395-1397, 2001.
- [14] A.Nashashibi, F.T.Ulaby, K.Sarabandi, ”Measurement and Modeling of the Millimeter-Wave Backscatter Response of Soil Surfaces”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.34, pp.561-572, 1996.
- [15] M.Kebiao, Z.Mengyang, W.Jianming, T.Huajun, Z.Qingbo, ”The Study of Soil Moisture Retrieval Algorithm from GNSS-R”, *International Workshop on Education Technology and Training & International Workshop on Geoscience and Remote Sensing*, vol.1, pp.438-442, 2008.