

災害通信における中継方式の検討

UDC 621.396.4
654.164.7

A Study on a Repeater System in the Communication System for Countermeasures against Natural Hazards

安田 靖彦*・津野 浩一*

Yasuhiko YASUDA and Koichi TSUNO

1. まえがき

筆者等が検討している非常災害対策用広域多点情報収集システム^{1), 2)}において、個々の送信端末から中央受信局への電波の到達距離は、たかだか4km程度しかないと実験において明らかとなった^{2), 3)}。この原因は電波に対する都市の複雑な各種障害物によるものであって、可搬形送信端末の送信電力を多少あげる程度では解決できない。そこで、中継を組み込んだシステムの検討が必要である。ここでは、ランダムアクセスパケット通信の特徴に整合した一つの中継方式を想定して検討を加えたのでご報告する。

2. 中継系のモデル

いまゾーン構成は移動無線で知られている方式を用いることにし、対象とする地域を図1に示すm個の正六角

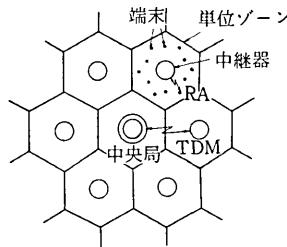


図1 中継ゾーンの構成

形の単位ゾーンで覆い、各単位ゾーンの中心に中継器を配する。各中継器は対応する単位ゾーン内から吸い上げたパケットを中央の受信局へ送信する。このシステムでは、端末一中継器間に端末の負担が軽いアロハ形⁴⁾のランダムアクセス方式を用いるので、これまでに検討した機器²⁾がそのまま使用できる。また中継器一局間は帯域利用効率の高い時分割方式を用いる。この結果構成は多少複雑になるが、中継器は数がそれほど多くないので、システム全体のバランスは保たれている。

いまこの地域全体として一定帯域の無線周波数帯域¹⁾を割当てられているとすると、単位ゾーン内でランダムアクセス(RA)チャネルと中継器一局間の時分割(TDM)チャネルとが相互干渉を起さないために、両チャ

ネルで使用する周波数帯域を分ける必要がある。また、RAチャネルの場合隣接単位ゾーン間で同一周波数を使用すると相互干渉を起こすおそれがあるので、移動無線で行われるように、RAチャネルに割り当てる帯域をl個($l = 3, 4, 7, \dots$ 等)に分割し、互いに異なる周波数帯域を使用する。

このシステムでの一つの問題は、回線利用効率(スループット)及びパケット遅延の観点から与えられた全帯域をRAおよびTDMチャネルにいかに割り振るかという問題である。次節以降この問題を中心に検討する。

3. スループット

初めに次の仮定をおく。

RAチャネルに割り当てる帯域幅: α WHz

TDMチャネルに割り当てる帯域幅:

$$(1 - \alpha) \text{ WHz}$$

パケットを構成するビット数: b ビット=一定

1ビットが専有する等価無線帯域幅: 1 Hz

これによって全帯域 WHz を占有するとしたときのパケット継続時間 τ は次式で与えられる。

$$\tau = b / W \text{ (sec)}$$

次に各端末は互いに独立で、再送分も含めたシステムの全端末からのパケットの生起時点は、 τ sec 当り G_t なる生起率のポアソン過程に従うとする。

さて一つの単位ゾーン内のアロハ形RAチャネルでは一般にパケット継続時間 τ sec 当りのスループットは同じく T 秒当りのトラヒック g の関数として、次式のように表せる。

$$s = f(g) \quad (1)$$

ここで $f(g)$ は、純アロハの場合、 $f(g) = g \exp(-2g)$ 、またスロット付アロハの場合、 $f(g) = g \exp(-g)$ である。

前記の設定により、RA部、TDM部におけるパケット継続時間を、それぞれ τ_{RA} 、および τ_{TDM} とすれば、

$$\tau_{RA} = l\tau / \alpha, \quad \tau_{TDM} = \tau / (1 - \alpha) \quad (2)$$

となる。また第 i 単位ゾーンにおける τ sec 当りのトラヒックを G_{ti} ($i = 1, 2, \dots, m$) とすれば、

* 東京大学生産技術研究所 第3部

$$G_t = \sum_{i=1}^m G_{ti} \quad (3)$$

が成立している。

τ_{RA} sec 当り第 i 単位ゾーンのスループットは、 $f(lG_{ti}/\alpha)$ であるから、TDM 部 1 フルーム τ_f 秒当たりでは、第 i 単位ゾーンの中継器 R_i に、平均次式で表わされる ρ_i 個のパケットが RA 部で正しく受信される。

$$\rho_i = \frac{\tau_f}{\tau} \cdot \frac{\alpha}{l} \cdot f\left(\frac{lG_{ti}}{\alpha}\right) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

1 フレームについて考えると、第 i 単位ゾーンにおいて、RA 部で送信に成功したパケットの個数が、TDM 1 フレーム内で、その単位ゾーンの中継器 R_i に割り当てられたタイムスロット個数 h_i と同じか少なければ、平均的にはそのまま局へそのフレーム内で送られるが、反対に多い場合は、 h_i 個のパケットしか送ることができず、残りはバッファに入れられ、待機させられる。従って 1 フレーム当り第 i 中継器 R_i から局へ送信されるパケットの平均個数 S_i は、

$$S_i = \min(\rho_i, h_i) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

で表わされる。また h_i についてはもちろん、

$$T_f = \tau_{TDM} \sum_{i=1}^m h_i \quad (6)$$

の関係が成立している。

システム内の全端末から局方向への全スループットは

$$S = \sum_{i=1}^m S_i \quad (7)$$

で与えられるが、簡単な計算により S は全単位ゾーンが同一のトラヒック

$$G_{ti} = \frac{G_t}{m} \quad (8)$$

をもつとき最大となることが示される。このときシステムの性質上

$$h_i \triangleq h, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$\tau_f = hm\tau / (1 - \alpha) \quad (10)$$

$$\rho_i = \frac{ham}{l(1-\alpha)} f\left(\frac{lG_t}{am}\right) \triangleq \rho \quad (11)$$

とおくことになる。これらの関係を用いて、システム全体としてのトラヒックースループットの関係は次のように書ける。

$$\begin{aligned} S &= \frac{\tau}{T_f} \sum_{i=1}^m \min(\rho, h) \\ &= \min\left(\frac{am}{l} f\left(\frac{lG_t}{am}\right), 1 - \alpha\right) \quad (12) \end{aligned}$$

純アロハの場合、上式を単位ゾーンの数 $m = 10$ 、RA 部で使用する周波数の個数 $l = 1, 3$ として評価すると、図 2 に示すようになる。ただし、図中破線は、中継なしで

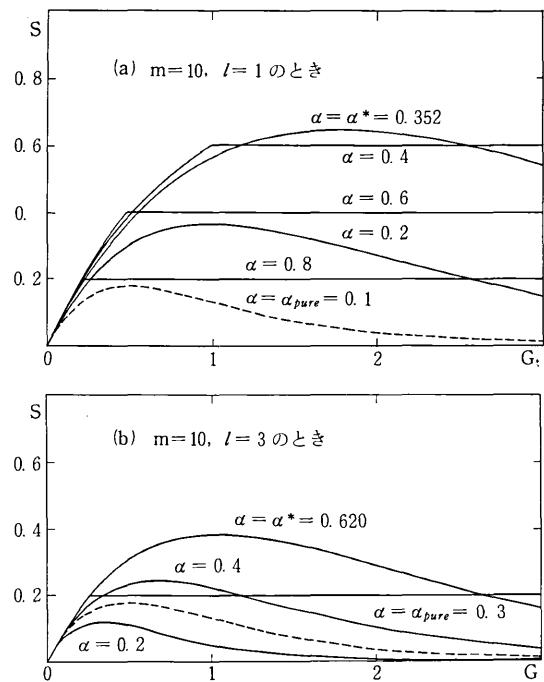


図 2 端末トラヒックースループット特性

全システムに直接純アロハを適用した場合の特性である。これは本方式で、

$$\alpha = \alpha_{pure} = \frac{l}{m} \quad (13)$$

とおいた場合に相当している。

S の G_t による最大値をシステム容量 C と定義すると、 C は α によって変わる。⁽¹⁴⁾ 式から

$$C_{max} = \max_{\alpha, G_t} S$$

$$= \max_{0 < \alpha < 1} \left[\min\left(\frac{am}{l} C_{RA}(\infty), 1 - \alpha\right) \right] \quad (14)$$

と書ける。ここで $C_{RA}(\infty)$ は無限ユーザモデル（端末数無限大）における RA 方式の容量を表わし、

$$C_{RA}(\infty) = \frac{1}{ae} \quad (15)$$

で与えられる。ただし、 a は純アロハ方式の場合 2、スロット付アロハの場合 1 をとるものとする。

(14)式は、

$$\frac{am}{l} C_{RA}(\infty) = 1 - \alpha \quad (16)$$

のとき最大となり、このときの α を α^* と書けば、

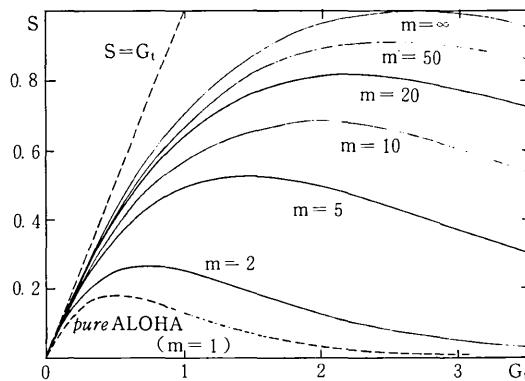
$$\alpha^* = \frac{l}{mC_{RA}(\infty) + l} \quad (17)$$

となる。また容量は、

$$C_{max} = \frac{mC_{RA}(\infty)}{mC_{RA}(\infty) + l} \quad (18)$$

で与えられる。

図2から分るように、 α を0から大きくしていくと、RA部で成功するパケットの数が増え、まず $\alpha = \alpha_{pure}$ で純アロハ方式だけの場合に等しくなり、 $\alpha = \alpha^*$ でSは最高に到する。その後はTDM部での飽和領域が広がりはじめ、容量は小さくなっていく。図3は、各mで α

図3 mによる $G_t - S$ 特性の変化

$= \alpha^*$ としたときの $G_t - S$ の関係を示す。 m が大きくなると S も増加し、 $m \rightarrow \infty$ の極限で、

$$S = G_t \exp\left(-\frac{G_t}{e}\right) \quad (19)$$

となる。

4. 平均遅延時間

この中継系において、端末で生起した一つのパケットが中継器を介して中央受信局に正しく受信されるまでに要する時間は、端末一中継器間のRA部で要する時間ならびに、中継器一局間のバッファを含むTDM部で要する時間との和で表される。これらの時間はいずれもランダム変数であるので、総合遅延時間もランダムに変動する。ここではその平均遅延時間について考察する。

4.1. RA部の平均遅延時間

RA部での平均遅延時間 D_{RA} は次式に示す構成要素からなる。

$$D_{RA} = (\tau_{RA} + T_{pl}) + \left(\frac{g}{s} - 1\right) (\tau_{RA} + T_{pl} + tout + \bar{X}) \quad (20)$$

ここで、 τ_{RA} : RA部のパケット継続時間、 T_{pl} : 端末一中継器間の伝搬遅延、 \bar{X} : 再送遅延の平均値、 $tout$: 衝突確認に要する時間、 g 、 s : パケット継続時間あたりのトラヒックおよびスループットを表す。例えばRA方式として純アロハ方式を用いる場合には $g/s = \exp(2g)$ となる。また \bar{X} に関しては、普通 τ_{RA} より1桁から2桁大きい値とする。

しかし、上式では \bar{X} が g そのものに影響し、 $s = 1/e$ で、その遅延時間が無限大に発散することなどが表現で

きないので、実際との一致がよくない。そこで、ここでは別途シミュレーション結果から求められた次の近似式を用いることにする⁵⁾。

$$\frac{D_{RA}}{\tau_{RA}} = \left(\frac{C_{RA}}{C_{RA} - s}\right)^{\alpha} \quad (21)$$

各mで、 $\alpha = \alpha^*$ としたときの τ で正規化した D_{RA} を図4に示す。

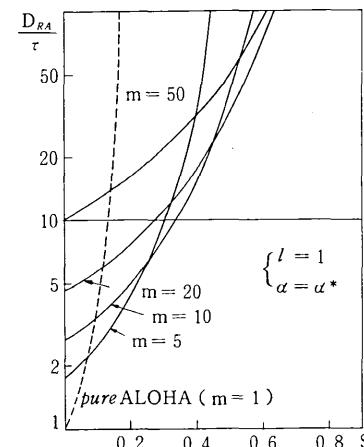


図4 TDMA併用pure ALOHA中継方式におけるランダムアクセス部の遅延時間-スループット特性

4.2. TDM部の平均遅延時間

RA部で正しく中継器に受信されるパケットの到着時点の分布は、シミュレーションによれば大体ポアソン分布に従うとしてよい⁶⁾。またTDM部の平均遅延時間 D_{TDM} にはTDM 1フレーム内で一つの中継器に割り当てるタイムスロット数 h が関係する。シミュレーションによれば D_{RA} は h を大きくするほど大きくなる。そこでここでは $h = 1$ として D_{RA} を評価する。さらに各中継器におくバッファメモリの容量は充分に大きいとする。

このような仮定をおいたとき、 D_{TDM} を求める問題は、客の到着が生起率 λ ($= \rho / T_f$) パケット/sec のポアソン到着で、サービス時間が一定 $1/\mu$ ($= T_f \text{ sec}$)、窓口1個のM/0/1の待行列系モデルで表される。従ってこの場合、到着から伝送が始まるまでの平均待ち時間 Wq は、

$$Wq = \frac{\rho}{2(1-\rho)} T_f \quad (22)$$

$$\rho = \lambda T_f = \frac{\alpha m}{l(1-\alpha)} f\left(\frac{lG_t}{\alpha m}\right) \quad (23)$$

で与えられる。またパケット生起は、平均してレフレーム内の中央であるとしてよいから、 D_{TDM} は次のように表せる。

$$D_{TDM} = \frac{1}{2} T_f + Wq + \tau_{TDM} \quad (24)$$

これを τ で正規化して書き直すと、

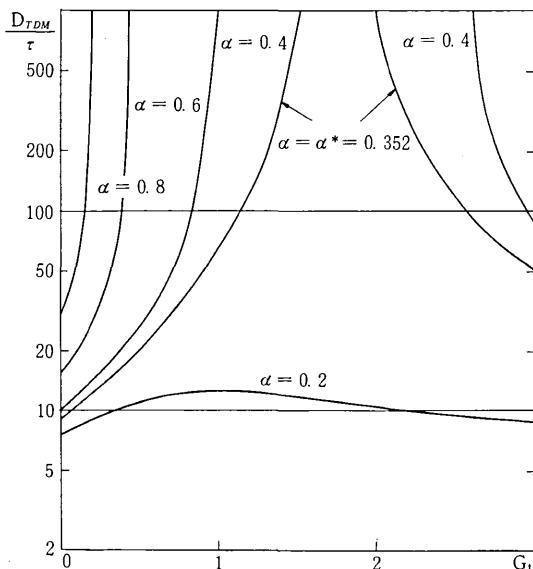


図5 端末トラヒックとTDMA部平均遅延時間との関係
係 ($m=10$, $l=1$) (pure ALOHA方式の場合)

$$\frac{D_{TDM}}{\tau} = \frac{1}{1-\alpha} \left\{ \frac{m}{2(1-\rho)} + 1 \right\} \quad (25)$$

となる。 $m=10$, $l=1$ で α をパラメータとして描いた $G_t - D_{TDM}/\tau$ の関係を図5に示す。スループット S は $\alpha = \alpha^*$ で最大となるが、遅延時間 D_{TDM} は α^* 以上の α で発散してしまうことが分る。

4.3. 総合平均遅延時間特性

本システムの端末一局間の総合平均遅延時間 D は前記二つの遅延時間の和、すなわち

$$D = D_{RA} + D_{TDM} \quad (26)$$

で表される。これをスループット S と D との関係として描いたのが図6である。同図(a)は $l=1$ でパラメータを m とした場合、また(b)は $m=10$ で l をパラメータとした場合を示す。これらの図から、スループットを大きくとるために、 m の大きい本システムがすぐれていることがわかる。

5. む　す　び

本文では災害情報の収集システムにおける中継方式として、対象地域を六角形の単位ゾーンで分割し、単位ゾーン内で端末から中継器への通信にはランダムアクセス方式を、また中継器と中央受信局との通信には時分割方式を用いる方式を想定して検討を加えた。トラヒックースループット特性あるいはスループット—平均遅延時間特性等の解析から、想定した中継方式の特長が明らかになった。

(1977年9月22日受理)

参考文献

- 1) 安田, "非常災害対策用広域多点情報収集システムに関する研究", 生産研究, 27卷, 3号, pp. 16~19 (昭50~03)

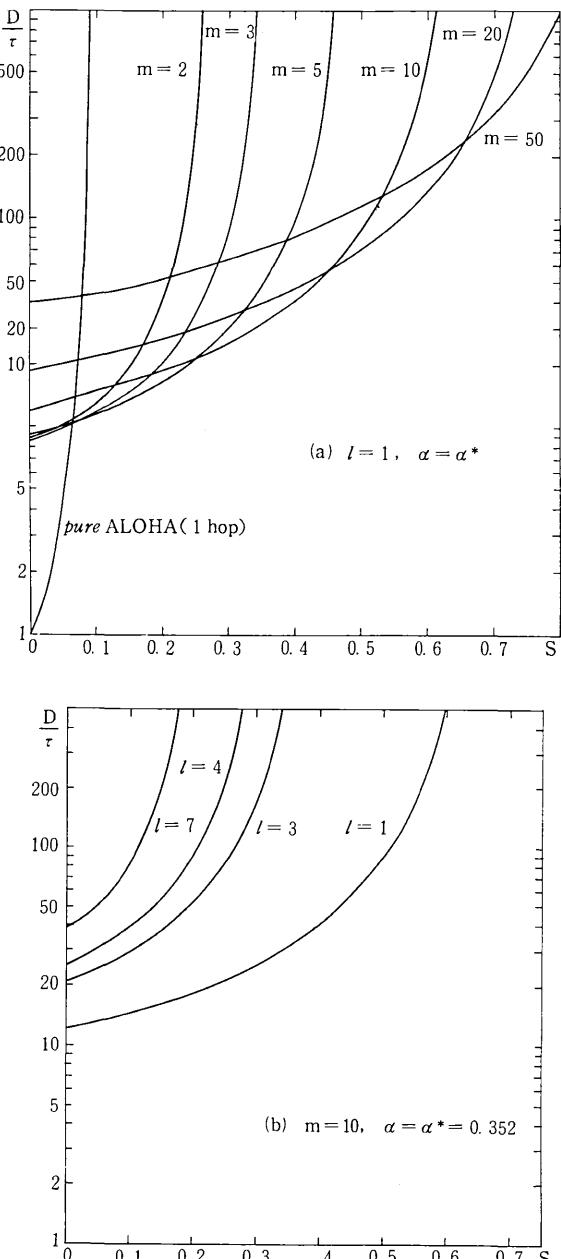


図6 分割帯域RA-TDM中継方式のS-D特性

- 2) 安田, 田坂, "非常災害対策用広域多点情報収集システムに関する研究—その2", 生産研究, 28卷, 4号, pp. 10~15 (昭51~04)
- 3) 安田, "非常災害対策用広域多点情報収集システム—その3", 生産研究, 29卷, 11号, 本号 (昭52~11)
- 4) N. Abramson, "The ALOHA system—another alternative for computer communications," FJCC AFI-PS Conf. Proc. 37, p. 281 (1970)
- 5) L. Kleinrock and F. A. Tobagi, "Packet switching in radio channels: Part I" IEEE Trans. COM-23, 12, p. 1400 (Dec. 1975)