

無線アクセスにおけるタイムスロット数の最適化

01701460 (株)東芝 研究開発センター
01206090

(株)東芝 情報・通信システム技術研究所

*米田 清 YONEDA Kiyoshi

坂本 英夫 SAKAMOTO Hideo

新田 克己 NITTA Katsumi

1 対象システム

本稿で扱うアクセス方式の応用例の1つに、無線タグシステムがある。これはタグと呼ばれる情報記憶媒体と、その読取りを主に行うリーダーライター (RW) から構成される。

タグは非接触 IC カードの一種であり、各タグには identification (ID) 符号が付与されている。タグが付いた人や物が RW の近くを通過する際、RW はタグの ID を読み取る。この際、1 個ずつタグの ID を読み取るのではなく、複数のタグを同時に読み取る。複数のタグを同時に読み取ることを、マルチリードと呼ぶ。本稿では、全てのタグを読み取り終るまでの時間を最小にすることを目的とする。

2 プロトコル

マルチリードで複数のタグが各自の ID を同時に送信すると、衝突が発生する。これを考慮して、以下の手順で ID を送信する。

1. RW は時間スロットの数を指定して、タグに対して ID を要求する。
2. タグは各自、どのスロットで送信するかを決める。
3. 各タグは各自が決めたスロットで、ID を送信する。
4. RW は、読み取った ID をタグに対して復唱送信する。
5. 自分の ID を受信したタグは、了解信号を返して沈黙する。
6. 上記 1 から 5 までの手順を 1 サイクルとし、作業 3 において ID の送信が無くなるまでサイクルを繰り返す。

RW が指定するスロット数は、任意とする。また、スロット数はサイクル毎に変更できる。タグは、サイクル毎に乱数を発生し、何番目のスロットで送信するかを決める。各タグは、送信スロット番号を独立に決めるので、複数個のタグが同一のスロットで送信しようとしたり、使われないスロットが発生する可能性がある。図 1 のスロット 2 のように、2 個以上のタグが同一のスロットを使って送信する場合は、RW は全てのタグの ID を認識できないと仮定する。RW がタグの ID を認識できるのは、1 個のタグが 1 つのスロットを使って送信する場合だけである。

3 最適スロット数

全てのタグを読み取り終るまでの時間を最小にしたい。各サイクルで指定するスロット数を小さくしすぎると衝突が発生し、サイクル回数が増加する。スロット数を大きくしすぎると、使われないむだなスロットが増え、通信時間がかかる。そこでサイクル毎に、読み取りに成功するタグ数を最大にするようなスロット数を求める。そのためには、1 スロットに 1 タグとなる確率を最大にすれば良い。

まず、読み取るタグの数が既知の場合について、ID 送信の成功確率を最大にするスロット数を求める。 s : スロット数、 t : タグ数とする。タグは送信するスロット番号をほかのタグとは独立に決めているので、あるスロットを使う確率は、 $1/s$ である。つまり、1 つのスロットを使うタグの数は、 t と $1/s$ をパラメータとする二項分布に従う。

- p_0 : 0 個のタグがスロットを使う (むだ) 確率
 p_1 : 1 個のタグがスロットを使う (成功) 確率
 p_2 : 2 個以上のタグがスロットを使う (衝突) 確率

とすると、

$$p_0 = \left(\frac{s-1}{s}\right)^t \quad (1)$$

$$p_1 = t \frac{1}{s} \left(\frac{s-1}{s}\right)^{t-1} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} p_2 &= 1 - p(0) - p(1) \\ &= 1 - \left(\frac{s-1}{s}\right)^t - \frac{t}{s} \left(\frac{s-1}{s}\right)^{t-1} \end{aligned} \quad (3)$$

と表わせる。

成功確率 p_1 を最大にするスロット数を求める。 $\partial p_1 / \partial s = 0$ と置いて解くと、 $s = t$ であること。結局、成功確率 p_1 は、スロット数と読み取るべきタグの数とが一致する時に最大になる。

図 2 は、タグが 100 個の場合の読み取り成功確率を表す。縦軸が成功確率、横軸がスロット数である。

最適スロット数 $s^* = t$ での成功確率 p_1 は、

$$p_1^* = \frac{t \left(\frac{t-1}{t}\right)^t}{t-1} \quad (4)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p_1^* = e^{-1} \approx 0.368 \quad (5)$$

	×(空)	×(衝突)	○	○	×(衝突)	×(空)	×(衝突)	○
1		タグA タグB	タグC	タグD	タグE タグF		タグG タグH タグI	タグK

成功: タグC、タグD、タグK
 失敗: タグA、タグB、タグE、タグF、タグG、タグH、タグI

図 1: スロット数 8 の場合の例

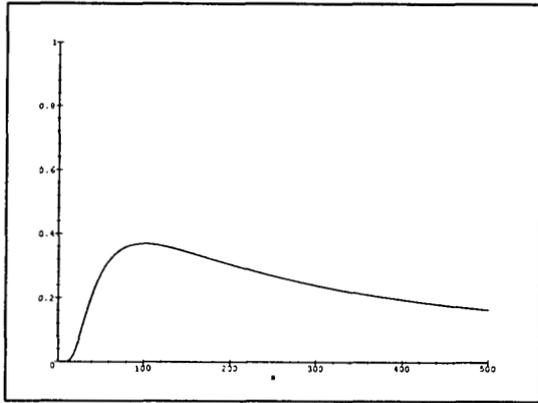


図 2: 読み取り成功確率 p_1 ($t = 100$)

となる。スロット数は整数なので、 s^* の小数点以下を切り上げまたは切り下げた整数の、 p_1^* が大きい方を探る。

4 タグ数の推定

実際には各サイクルで読み取るべきタグの数は未知である。そこで、サイクル中の空きスロット数と読み取りに成功したタグ数から、与えられたタグの数を推定する方法を作る。読み残したタグの数は、(タグの数) - (読み取ったタグの数) である。読み残したタグの数がわかれば、前節の結果より、次回サイクルのスロット数を定めることができる。

記号を以下のように定める。

- s : 現在のスロット数
- t : 現在のタグ数
- n_0 : 使われなかったスロット数
- n_1 : ID 送信に成功したスロット数 (読み取りに成功したタグ数)
- n_2 : 複数のタグが使用したために衝突を起こしたスロット数
- q_0 : 0 個のタグが使ったスロットの割合 ($= n_0/s$)
- q_1 : 1 個のタグが使ったスロットの割合 ($= n_1/s$)
- q_2 : 衝突が発生したスロットの割合 ($= n_2/s$)

ただし $n_0 + n_1 + n_2 = s$ である。 s と n_0 と n_1 から、現在のタグ数 t を推定する。 $t - n_1$ が読み取れなかったタグの数なので、次回サイクルのスロット数が決められる。

理論値 p_i が観測値 q_i に ($i = 0, 1, 2$) なるべく一致するような t を求める。一致の尺度は、Kullback-Leibler (KL) 情報量 $I(t) = \sum_{i=0}^2 q_i \log(q_i/p_i)$ を用いる。KL 情報量は $\forall i q_i = p_i$ のとき、最小 $I(t) = 0$ になる。

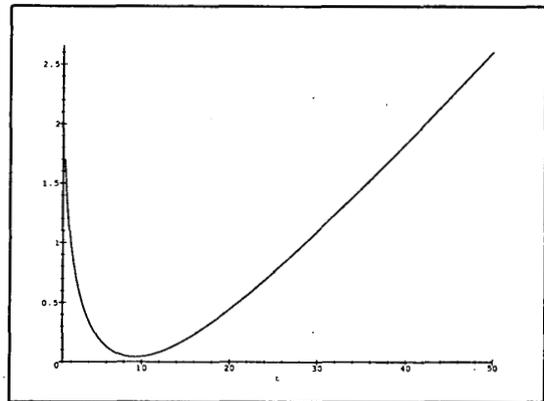


図 3: KL 情報量 ($s = 8, n_0 = 3, n_1 = 2$)

$I(t)$ を最小にする t を求める。KL 情報量は、図 3 のように凸なので、 $\partial I(t)/\partial t = 0$ とおいて t について解けば良い。

5 まとめ

多重アクセスプロトコルの一種において、通信主体の数を推定し、時間スロット数を制御して、通信時間を最小化した。最適スロット数は以下の手順で求められる。

1. s と n_0 と n_1 を入力する。
2. $\partial I(t)/\partial t = 0$ を t について解き、 t^* とする。
3. $[t^* - n_1]$ と $[t^* + n_1]$ のうち、 p_1 が大きくなる方を次回サイクルのスロット数 s^* とする。