Bluetooth ピコネットにおける帯域割り当て手法の評価

中岡　謙† 加藤　正美†
†三洋電機株式会社　デジタルシステム研究所

1. はじめに

1 つのマスタと最大 7 つのスレーブによって形成される Bluetooth[1]のピコネットでは、625μs のタイムスロットを最小単位とする TDMA/TDD によってマスタースレーブ間の通信を行う。そのため、1 つのマスタと複数のスレーブによるポイントーマルチポイント通信の場合、マスタと各スレーブはお互いにピコネット内の通信帯域を共有することになる。ところが、マスタースレーブ間の各無線リンクで必要となる通信帯域は、マスタースレーブ間で送受信されるメディアの種類や、マスタ或いはスレーブとして動作する PDA や携帯電話等におけるアプリケーションの動作状況などによって異なる。従って、ピコネット内で共有される通信帯域を各無線リンクに適切に割り当てるための仕組みが必要となる[2]。

マスタースレーブ間の無線リンクの伝送帯域を決定する MAC 層パラメータとしては、ACL（Asynchronous Connection-Less）リンクに対して適用される「ACL パケットタイプ」と、マスタからスレーブへのポーリング周期を規定する「最大ポーリング間隔」の 2 つのパラメータがある。しかしながら、ポイントーマルチポイント通信の場合は、各無線リンクの MAC 層パラメータが他の無線リンクの帯域に影響を与えるため、全ての無線リンクにおいて所望の帯域を実現するような MAC 層パラメータを決定するには困難を要する。

そこで、文献[3]では、Bluetooth ポイントーマルチポイント通信において、ピコネット内の各無線リンクに所望の帯域を割り当てるための評価関数を設定し、各無線リンクにおける適切な MAC 層パラメータ値の組み合わせを遺伝的アルゴリズム（GA: Genetic Algorithm）[4]によって探索する手法を提案した。ただし、文献[3]で行われている計算機シミュレーションでは、マスタからスレーブ方向の無線リンクのみに対して帯域を割り当てている。そこで、本稿ではマスタースレーブ双方向の無線リンクに帯域を割り当てる場合の提案手法の評価を行う。また、本稿では上記 2 つの MAC 層パラメータに加えて、新たな MAC 層パラメータを導入することで、マスタースレーブ双方向の各無線リンクに対してより適切な帯域割り当てが可能となることを示す。

2. 遺伝的アルゴリズムによる MAC 層パラメータの探索

マスタースレーブ双方向の各無線リンクに対して要求帯域を設定し、本要求帯域に即した帯域を各無線リンクに割り当てることのできる MAC 層パラメータの値を GA によって探索する。

2.1 遺伝的アルゴリズムによる探索手法

GA では、与えられた問題の解を表現する個体に対して、選択、交叉、突然変異といった遺伝的演算を施す。この遺伝的演算は、準最適解が得られるまで繰り返される。なお、本稿における準最適解とは、所望の帯域をほぼ実現することのできる MAC 層パラメータの値の組み合わせを指す。

ACL パケットタイプと最大ポーリング間隔の各 MAC 層パラメータによって構成される個体を図 1 に示す。図 1 において、P_{MS_1} はマスタからスレーブ 1 方向における ACL パケットタイプを示し、P_{S_1M} はスレーブ 1 からマスタ方向における ACL パケットタイプを示す。また、L_1 はマスタからスレーブ 1 に対する最大ポーリング間隔を示す。図 1 はマスタに接続されたスレーブが n 個の場合の個体を示しており、$n \leqq 7$ である。

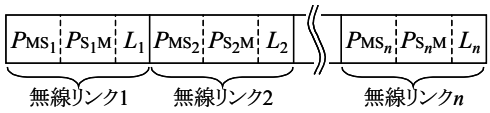

図1　個体の表現

GA による準最適解の探索手順を図 2 に示す。まず、1 世代目の初期個体を生成する。次に、評価関数に基づいて各個体を評価し、解としての個体の善し悪しを示す適応度（評価値）をそれぞれの個体について求める。そして、個体の選択として、適応度の低い個体を淘汰し、適応度の高い個体を増殖する。その後、選択によって生き残った個体に対し、2 つの個体の一部分を入れ替える交叉と、個体を構成するパラメータの値をある確率に基づいて変更する突然変異を施すことで、次世代の個体を生成する。個体の評価から突然変異までの処理を繰り返し、予め設定しておいた最終世代に到達した時点で最も適応度の高い個体が準最適解となる。

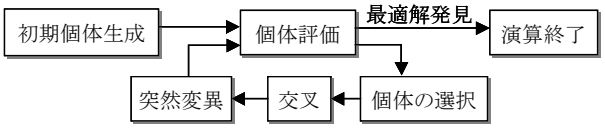

図2　GAによる準最適解の探索手順

2.2 評価関数

個体を構成する MAC 層パラメータの値に基づいて、各無線リンクに割り当てられる帯域（以下、割当帯域と呼ぶ）が決定される。そこで、要求帯域と割当帯域から個体を評価するための評価関数を、以下の指針に基づいて設定する[3]。

(A)各無線リンクにおける割当帯域が要求帯域に近いほど、適応度が高くなる。
(B) 各無線リンクにおける要求帯域と割当帯域の割合が、全無線リンクにおいて均一になるほど、適応度が高くなる。

上記の指針に基づいて定義された評価関数を式(1)に示す。左辺の F は各個体に与えられる適応度である。B_{max} と B_{fair} はそれぞれ指針(A)及び(B)に基づいて算出される値であり、最小値は 0.0、最大値は 100.0 へと正規化される。また、ω_{max} と ω_{fair} はそれぞれ B_{max} と B_{fair} に対する重み付け変数である。

$$F = \frac{\omega_{max} \cdot B_{max} + \omega_{fair} \cdot B_{fair}}{\omega_{max} + \omega_{fair}} \quad (1)$$

3.シミュレーションによる評価

3.1 シミュレーション条件

個体を構成する MAC 層パラメータのうち、ACL パケットタイプは DM1 から DH5 までの 6 種類、最大ポーリング

An Evaluation of Bandwidth Assignment Technique for Bluetooth Piconet
Ken NAKAOKA†, Masami KATO†
†SANYO Electric Co., Ltd. Digital Systems Development Center

間隔は $10 \leqq L \leqq 256$ とする。また、マスタに接続されるスレーブ数は 7 とする。

GA の設定条件としては、個体数を 10、個体選択において淘汰される個体数を 4、個体への突然変異確率を 5%とし、交叉は各無線リンクの切れ目（図 1 参照）を交叉点とする一点交叉を採用する。また、最終世代（探索回数）は 3000 世代とする。式(1)における重み付け変数は、$\omega_{\max}$ = 1.0、ω_{fair} = 3.0 とする。

3.2 シミュレーション結果

各無線リンクにおける要求帯域、GA による探索で得られた MAC 層パラメータの値（表の網掛部）、並びに、MAC 層パラメータの値から求められた割当帯域を表 1 に示す。表 1 は最終世代に到達したときの個体群の中で適応度が最も高い個体の MAC 層パラメータを示している。

各無線リンクに対する要求帯域の合計がピコネット内で共有される最大帯域を越えているため、各無線リンクへの割当帯域が削減されることで、割当帯域の合計が最大帯域以内に収められている。また、要求帯域に対する割当帯域の割合も、各無線リンクにおいておおよそ均一化されている。ところが、マスタースレーブ双方向において同一の ACL パケットタイプが選択されている場合、要求帯域が異なっているにも関わらず、マスタースレーブ双方向への割当帯域は常に等しくなっている。これは以下の理由によるものである。

Bluetooth のピコネットでは、マスタからスレーブへのポーリングによってデータの送受信が行われる。そのため、対向しているマスタとスレーブにおける単位時間当たりのデータの送信回数は等しくなる。従って、マスタ及びスレーブが同一の ACL パケットタイプでデータを送信する場合、マスタースレーブ双方向に割り当てられる帯域も等しくなる。そのため、マスタースレーブ双方向に対して異なる帯域を割り当てるためには、マスタースレーブ双方向において異なる ACL パケットタイプを選択するしかない。しかしながら、ACL パケットタイプは全部で 6 種類しかないため、マスタースレーブ双方向への割当帯域を詳細に調整することは困難となる。

そこで、マスタースレーブ双方向に対して異なる帯域を詳細に割り当てるため、本稿では送信スキップ周期と呼ぶ新たな MAC 層パラメータを導入する。本パラメータはマスタースレーブ双方向に独立に設定する。本パラメータの値が例えば 10 であれば、10 回うち 1 回はパケットを送信せず、次のマスタ或いはスレーブへと送信機会を譲るものとする。本パラメータを導入することにより、個体は図 3 のように表現される。ここで、K_{MS_1} はマスタからスレーブ 1 方向における送信スキップ周期を示し、$K_{\text{S}_1\text{M}}$ はスレーブ 1 からマスタ方向における送信スキップ周期を示す。

次に、MAC 層パラメータとして新たに導入した送信スキップ周期の有効性を検証するためにシミュレーション行い、その結果を表 2 に示す。ただし、送信スキップ周期の最大値は 20 とし、その他のシミュレーション条件は、表 1 の場合と同一である。

マスタースレーブ双方向において同一の ACL パケットタイプが選択されている場合でも、適切な送信スキップ周期が設定されることにより、マスタースレーブ双方向への割当帯域が詳細に調整されている。また、MAC 層パラメータの探索終了時点における個体の適応度を見てみると、送信スキップ周期の導入前と後で、式(1)における B_{fair} の値がそれぞれ 90.1 と 95.8 であり（シミュレーション 10 回分の平均値）、送信スキップ周期によって各無線リンクにおける要求帯域と割当帯域の割合がより均一化されていることが分かる。

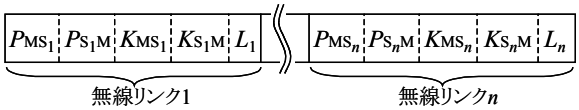

図3　個体の表現（3種類のMAC層パラメータ使用）

表1　探索されたMAC層パラメータと割当帯域

	スレーブ番号 i	1	2	3	4	5	6	7
マスタ↓スレーブ	要求帯域 (kbps)	16	48	80	112	144	176	208
	割当帯域 (kbps)	7	27	27	51	51	75	75
	パケット種別 P_{MS_i}	DM1	DM3	DM3	DM5	DM5	DH5	DH5
マスタ↑スレーブ	要求帯域 (kbps)	32	64	96	128	160	192	224
	割当帯域 (kbps)	12	27	42	51	78	75	75
	パケット種別 $P_{\text{S}_i\text{M}}$	DH1	DM3	DH3	DM5	DH5	DH5	DH5
	最大ポーリング間隔 L_i	24	70	182	120	124	144	94

表2　探索されたMAC層パラメータと割当帯域
（送信スキップ周期パラメータ導入後）

	スレーブ番号 i	1	2	3	4	5	6	7
マスタ↓スレーブ	要求帯域 (kbps)	16	48	80	112	144	176	208
	割当帯域 (kbps)	6	18	31	44	52	67	80
	パケット種別 P_{MS_i}	DM1	DM3	DM3	DM5	DH3	DH5	DH5
	スキップ周期 K_{MS_i}	2	2	9	3	19	3	6
マスタ↑スレーブ	要求帯域 (kbps)	32	64	96	128	160	192	224
	割当帯域 (kbps)	12	24	34	50	62	75	86
	パケット種別 $P_{\text{S}_i\text{M}}$	DH1	DM3	DM3	DH3	DM5	DH5	DH5
	スキップ周期 $K_{\text{S}_i\text{M}}$	3	3	20	18	15	4	9
	最大ポーリング間隔 L_i	28	164	214	234	244	226	120

4. おわりに

本稿では、Bluetooth ピコネット内の各無線リンクに所望の帯域を割り当てるため、各無線リンクにおける適切な MAC 層パラメータの値を GA によって探索した。また、MAC 層パラメータとして送信スキップ周期を新たに導入することで、マスタースレーブ双方向の無線リンクに対してより詳細な帯域割り当てが可能となることを示した。

なお、本稿で新たに導入した送信スキップ周期は、MAC 層におけるパラメータとして定義した。しかしながら、送信スキップ周期は Bluetooth の規格外であるため、実動作時においては MAC 層よりも上位のミドルウェア層、或いはアプリケーション層に本パラメータを実装する必要がある。その場合、MAC 層以下で行われる従来のポーリング動作と本パラメータとの連係についての検討も必要である。

また、本稿ではデスクトップ PC という計算機リソースが比較的豊富な端末においてパラメータの探索を行った。しかしながら、一般的に Bluetooth は PDA や携帯電話といった計算機リソースが制限される端末に搭載される。従って、実動作時におけるパラメータ探索に要する計算時間の短縮も大きな課題となる。個体数や突然変異確率といった GA に関するパラメータの最適化や、遺伝的演算方法の改善はもちろんのこと、パラメータ探索に要する計算負荷をピコネット内の端末に分散し、各端末における計算時間の短縮を図るといった負荷分散制御方法も今後の検討課題である。

参考文献

[1] “Specification of the Bluetooth System version 1.1” 、Feb. 2001

[2] 大倉、加藤、 “DM1 パケットを用いた Bluetooth ポイント・ツー・マルチポイント通信における帯域割り当ての実験的評価” 、信学技報、CQ2002-16

[3] 中岡、加藤、 “ Bluetooth ポイントーマルチポイント通信における帯域割り当て手法の提案 ” 、FIT2002、一般講演論文集第 4 分冊、pp185-186

[4] D.E. Goldberg、“Genetic Algorithms in search, optimization, and machine learning”、Addison-Wesley、1989