

電力用移動無線システムの最適化

所 健一, 松井 正一

1. はじめに

電力用移動無線システムは、電力会社が独自に構築・運用している移動無線システムであり、安定した電力を供給するうえで非常に重要な役割を果たしている。たとえば台風などの自然災害により電力の供給に障害が発生した場合、感電などの事故を未然に防ぎつつ、いち早く障害を復旧するには複数の作業班が連携して作業を進める必要があり、このためには電力用移動無線システムを用いた作業班の密接な連絡が不可欠なものとなっている。

この電力用移動無線システムのデジタル化を検討している電力会社において、近年の移動無線の急速な普及により、ますます貴重な資源となっている周波数を、いかに有効に利用するかが重要な課題となった。そこで、周波数を有効に活用するために必要となる、各基地局で最低限必要となるチャンネル数を明確に算定する方法と、利用周波数の帯域幅が最小となるように、各基地局に対し最適に周波数を割り当てる方法の二つについて検討を行った。本稿ではこの二つの検討内容について報告する。

一般的な必要チャンネル数の算定にはアーラン B 式 [1] が用いられることが多いが、これを電力用移動無線に適用するには 2 章で述べる問題がある。そこで、移動無線の利用がピークとなる台風などによる障害の復旧作業時を対象に、規定時間内に想定される障害箇所数の観点から、必要チャンネル数を算定する方法を開発した。提案方法では復旧作業における作業班の作業状態の推移を閉鎖型待ち行列網でモデル化し、この待ち行列網の解析から得られる復旧可能箇所数と通話待ち時間から、必要となるチャンネル数を算定する。

周波数の最適割当てに関しては、これまでも数多くの研究が行われており、さまざまな割当手法が提案

されている。しかし、これらの手法を電力用移動無線の周波数割当てに適用するには、計算時間や最適解への収束性の面で問題があった。そこで、ここでは基地局への最適な周波数割当てを求める手法として、貪欲アルゴリズムと遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) [2, 3] の組合せによる新たな割当手法を開発した。この手法を実際の割当問題に適用したところ、利用周波数の帯域幅が最小となる割当てが、非常に短い計算時間で求められ、周波数割当て作業の大幅な効率化が実現された。

本稿では次章において、必要チャンネル数の算定方法について説明する。また、3 章において周波数の最適割当手法について説明を行う。

2. 必要チャンネル数の算定

電力用移動無線システムのチャンネル数の算定にアーラン B 式を用いるには、以下の点で問題がある。

- アーラン B 式の導出においては、呼の到着が話中の呼数には依存せず、一定であること (無限呼源) を仮定する。しかし、電力用移動無線において同一チャンネルを共用する移動局数は数十であり、話中や通話待ちの移動局が増えれば、新たな呼の到着は少なくなると考えるのが自然である。
- 電力用移動無線では他の移動局の通話を傍受できるので、他の移動局によりチャンネルが利用されていた場合、この移動局の通話終了を待ち、終了と同時に通話を開始することができる。したがって、アーラン B 式のような即時式ではなく、チャンネル空きを待ち、チャンネル空きと同時に通話を開始できるとした待時式で必要チャンネル数を評価するのが適当である。
- アーラン B 式では呼はすべて同一に扱われるが、電力用移動無線においては後述するように、通信待ち時間に対する要求の異なる二つの通話が存在し、それぞれを別クラスの呼と考え、クラスの違いによる優先処理を考慮した必要チャンネル数の算

ところ けんいち, まつい しょういち
財団法人電力中央研究所
〒201-8511 狛江市岩戸北 2-11-1

定が必要となる。

そこで、新たな必要チャンネル数の算定方法について検討を行った。

2.1 復旧作業のモデル化

復旧作業は個々の作業班による、図1に示す一連の作業の繰り返しにより行われる。作業班は障害発生箇所へと移動し、そこで障害箇所の修復を行う。修復作業の完了後は開閉器を操作し、修復箇所への通電を再開し、最終的な通電の確認後、次の障害発生箇所へと移動する。この修復作業と開閉器操作作業を安全かつ円滑に進めるには、それぞれの作業の1ステップが終了する毎に、移動無線を用いて監督者へ報告を行うとともに、次の作業指示を受けることが必要となる。なお、これらの復旧作業における通話のうち、修復作業に関する通話については、ある程度の通信待ち時間が許容できるが、感電事故防止などの安全面に直接関わる開閉器操作に関する通話については、通信待ち時間に対する要求が厳しいという特徴がある。

ここでは上述の復旧作業を以下のようにモデル化したうえで、各基地局で必要となるチャンネル数の算定を行った。

2.1.1 部分作業への分割

復旧作業中に行われる通話に着目し、修復作業と開閉器操作作業を、それぞれ1回の通話を区切りとする部分作業に分割する。分割にあたっては、修復作業と



図1 復旧作業のフロー

開閉器操作作業中に行われる通話が、それぞれの作業時間内に一様に分布するものと仮定し、図2に示すように、修復作業が n_1 回の部分作業から構成され、開閉器操作作業が n_2 回の部分作業から構成されるものとする。ここで、 n_1, n_2 はそれぞれ、修復作業中、開閉器操作作業中に行われる通話回数を表している。

2.1.2 チャンネルの運用方式

復旧作業時における移動無線のチャンネルの運用を、通信待ち時間に対する要求の厳しい開閉器操作作業に関する通話には、割り込み優先権が与えられるものとしてモデル化する。つまり、チャンネルは開閉器操作作業に関する通話から優先して割り当てられるものとする。また、すべてのチャンネルが利用中であっても、修復作業に関する通話がチャンネルを利用していた場合には、これを一時中断し、即座に開閉器操作作業に関する通話を開始するものとする。

2.2 復旧可能箇所数からのチャンネル数算定

復旧作業における作業班の作業状態の推移をモデル化した閉鎖型の待ち行列網を解析することで、規定時間内の復旧可能箇所数と通信待ち時間を推定し、これから必要チャンネル数を算定した[4, 5]。

2.2.1 閉鎖型待ち行列網によるモデル化

図3の閉鎖型待ち行列網により、復旧作業における作業班の作業状態の推移をモデル化する。この閉鎖型待ち行列網では作業班(客)が優先度クラスを変化させ

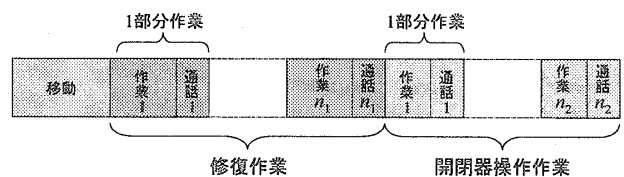


図2 部分作業のイメージ

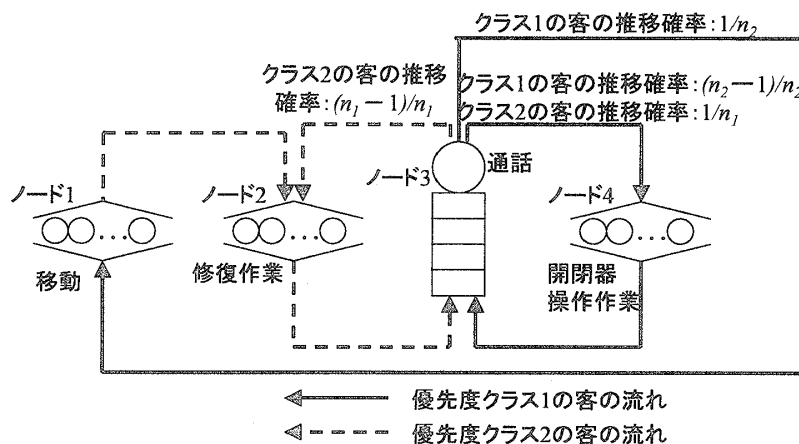


図3 閉鎖型待ち行列網による復旧作業フローのモデル化

ながら、復旧作業における「移動」、「修復作業」、「開閉器操作作業」、移動無線を用いた「通話」をそれぞれモデル化したノードを巡回する。図3の待ち行列網で、ノード1, 2, 4は到着と同時にサービスが受けられる、作業班の数と同数の窓口を持った待ち行列であり、ノード3は利用可能なチャンネル数と同数の窓口を持つ待ち行列である。ここでは修復作業を行っている作業班に相当する客の優先度をクラス2、開閉器操作作業を行っている作業班に相当する客の優先度をクラス1とし、ノード3におけるクラス1の客に対して、割り込み優先権を与える。

2.2.2 待ち行列網の解析

ここでは待ち行列網の定常状態の存在を仮定し、各ノードの客数を状態とするマルコフ連鎖の平衡方程式を解くことで、各ノードの平均客数を求めた[4, 5]。そして、この平均客数から、クラス1の客に割り込まれることによるクラス2の客の待ち時間の増加も考慮したうえで、クラス1, 2の客それぞれのノード3での平均待ち時間を計算し、これより修復作業と開閉器操作作業における通話の平均待ち時間を推定した。

また、この待ち行列網で客が網を循環する平均時間(ノード1を出た客が、再びノード1に戻ってくるまでの平均時間)は、作業班が一障害箇所への復旧作業を終了するのに要する平均時間に相当する。したがって、規定時間をこの平均循環時間で除算し、これに作業班の総数を乗じることで、図4に示すように復旧作業にあたる作業班全体で、規定時間に何箇所の復旧作業が完了できるかが推定できる。これより規定時間内に想定される障害箇所数の復旧が行え、通話待ち時間が規定値以下となるチャンネル数を見つけることで、必要チャンネル数の算定が行える。

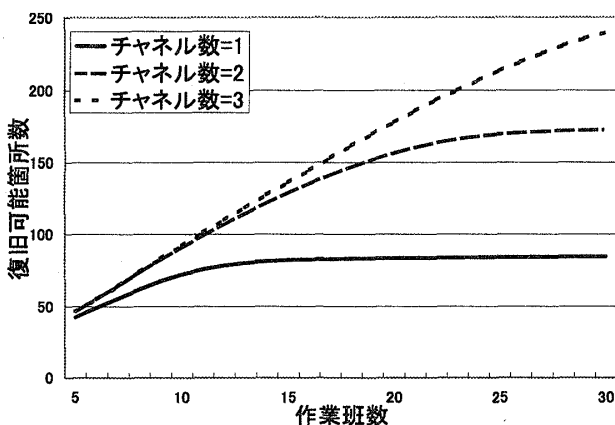


図4 復旧可能箇所数の推定結果

3. 周波数の最適割当て

各基地局の必要チャンネル数が与えられた条件で、利用周波数の帯域幅が最小となる、各基地局への周波数割当てを求める手法について検討した。なお、この割当て手法の詳細については、文献[6]を参照されたい。

3.1 定式化

電力用移動無線システムにおいて採用されているFCA (Fixed Channel Assignment) 方式を採用した移動無線システムの周波数割当て問題は、以下のように定式化される。なお、FCA方式とは、各基地局に対してあらかじめチャンネルを割り当てておき、その基地局のエリア内で発生した通話要求に対しては、その基地局に割り当てられたチャンネルの中から一つを選んで割り当てる方式である。

3.1.1 前提条件

以下のデータが与えられるものとする。

要求チャンネル数: 各基地局で必要となるチャンネル数が与えられるものとする。以降、基地局 i で必要なチャンネル数を r_i と記述する。なお、一台の送信機には最大二つのチャンネルが割当て可能であり、基地局には要求チャンネル数に合わせた台数の送信機が設置される。つまり基地局 i には $\lceil r_i/2 \rceil$ 台の送信機が設置されることになる。ここで $\lceil x \rceil$ は x 以上の最小の整数を表す。

基地局の干渉条件: すべての基地局の組に対して、信号対干渉電力比 (CIR) の値から、同一のチャンネルが利用可能かどうか与えられるとする。

3.1.2 目的関数

以下で定義する全基地局での使用周波数の帯域幅最小化と、干渉地域に位置する基地局での使用周波数の帯域幅最小化を目的に、基地局に周波数を割り当てる(図5)。なお、ここでは使用する周波数のうち、チャンネル番号最大のものと、最小のものとの差を帯域幅と定義する。

1. 使用周波数帯域幅の最小化: 全基地局で使用す

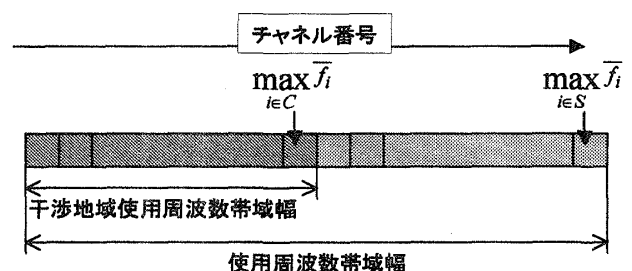


図5 周波数割当て問題の目的関数

る周波数の帯域幅を最小化する。 S を全基地局の集合、 \bar{f}_i を基地局 i に割り当てられたチャンネル番号最大の周波数とすると、 $\max_{i \in S} \bar{f}_i$ が最小となるように周波数を割り当てる。

2. 干渉地域使用周波数帯域幅の最小化：他電力会社の基地局との干渉地域に位置する基地局で使用する周波数の帯域幅を最小化する。 $C \subset S$ を干渉地域に設置される基地局の集合とすると、 $\max_{i \in C} \bar{f}_i$ が最小となるように周波数を割り当てる。

なお、一般的な周波数割当問題では、使用帯域幅の最小化のみを目的としており、二つの帯域幅の最小化を目的とする点において、上記の問題は一般的な周波数割当問題とは異なったものとなっている。

3.1.3 制約

以下の三つの制約条件が満たされるように周波数を割り当てる。

1. 同一チャンネル割当条件：信号対干渉電力比 (CIR) が許容値を越える基地局の組には、同一の周波数を割り当てない。

2. 同一局でのチャンネル間隔条件：同一の基地局に割り当てるチャンネルには、1チャンネル以上の間隔を設ける。

3. 同一送信機でのチャンネル間隔条件：同一の送信機に割り当てられるチャンネルは、間隔が7チャンネル以下となるようにする。

なお、一般的な周波数割当問題では上記の制約のうち、同一チャンネル割当条件と、同一局でのチャンネル間隔条件は考慮されているが、同一送信機でのチャンネル間隔条件を考慮したものはない。

3.2 必要帯域幅の下界値

以下のようにして作ったグラフ G の最大クリークの位数は、基地局へ周波数を割り当てるのに必要となる

帯域幅の下界値となる。

1. すべての基地局を対象に、一つの局を1頂点とし、同一のチャンネルを利用できない局同士を直接辺で結んだグラフを作る (図6(b))。

2. 各頂点を $r_i - 1$ 個複製する。この時、他の頂点との辺も同時に複製する (図6(c))。

3. 同じ局に相当する頂点同士を辺で結ぶ (図6(d))。

周波数を基地局に割り当てるには、このグラフ G で直接辺で結ばれた頂点は異なる色を塗るという条件の下で、頂点を塗り分けるのに必要な色数のチャンネルが最低限必要となる。そして、グラフ G の頂点を塗り分けるには、最低でもこのグラフの最大クリークの位数の色数が必要となるので、グラフ G の最大クリークの位数は、必要な帯域幅のチャンネル数の下界値となる。ただし、この最大クリークにより求まるのは、あくまで必要となる帯域幅の下界値である。グラフ G の作成には、制約条件のうちのチャンネル間隔条件は考慮していないため、実際にはこれ以上のチャンネル数が必要となることもある。

なお、最大クリークを求めること自体 NP 完全な問題となるが、最大クリークを効率的に求める手法が提案されており [7]、周波数割当てに関するグラフについては、これを用いることで比較的容易に最大クリークを求めることができる。

3.3 割当手法

開発した割当手法では、貪欲アルゴリズムと GA の組合せにより、二つの使用周波数の帯域幅が最小となる基地局への最適な周波数割当てを探索する。

3.3.1 貪欲アルゴリズム

使用する帯域幅がなるべく小さくなるように、送信機に周波数を割り当てる方法の一つに、割当て可能な

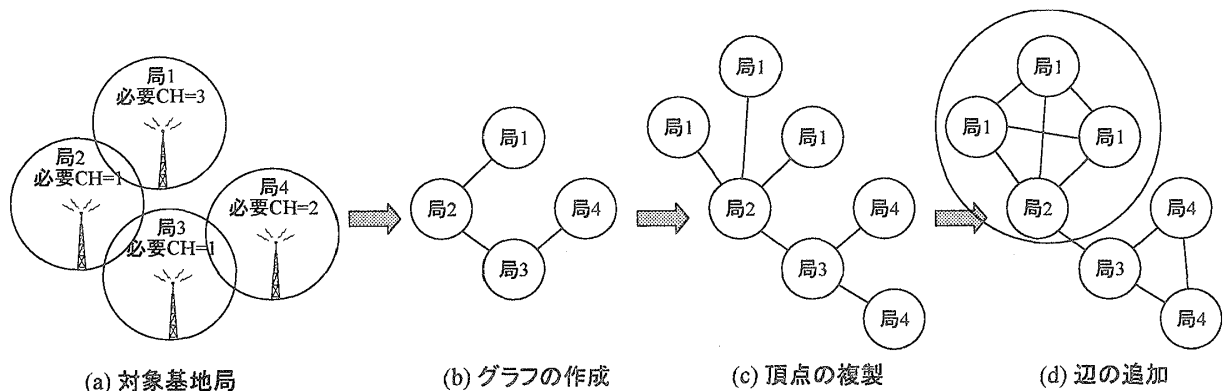


図6 彩色問題としての定式化

周波数のうち、チャンネル番号最小のものから順次割当てを行っていく方法が考えられる。提案手法では、この貪欲アルゴリズムにより送信機に周波数を割り当てることを基本に、GAにより最適な送信機への周波数の割当順序を探索する。

3.3.2 GAによる最適割当順序の探索

GAを用いて最適な割当順序を探索するのに、以下の設定を行った。

(a) 染色体表現

基地局に設置される送信機に1から*n*までの番号を付けたうえで、チャンネルを割り当てていく送信機の順序を染色体として表現する。ここで*n*は管内全体で設置される送信機の総数を表し、一台の送信機には最大二つのチャンネルが割当て可能であることから、 $n = \sum_{i \in S} \lceil r_i / 2 \rceil$ と計算される。

この染色体表現での*i*番目の遺伝子は、*i*-1番目までの遺伝子の情報に従った割当てが行われた時点で、次に周波数を割り当てる送信機が、未割当てリストの何番目の要素であるかを表している。未割当てリストとは、まだ周波数が割り当てられていない送信機の番号を列挙したものである。例としてチャンネルを割り当てる送信機の総数が7の場合における、染色体(1, 5, 3, 1, 3, 1, 1)に対応する送信機の割当順序を図7に示した。なお、図7の縦に並んだ数値列は、それぞれの割当て時における未割当てリストを表している。

また、最大クリークに属する基地局間では、同一の周波数を使用することはできず、これらの基地局は干渉条件が厳しい(割当てが難しい)局の集まりと考えることができる。そこで基地局全体を対象としたグラフと、干渉地域に位置する基地局のみを対象としたグラフの最大クリークをそれぞれ求め、(1)全体での最大

クリークに含まれる基地局に設置される送信機、(2)干渉地域での最大クリークに含まれる基地局に設置される送信機、(3)その他の送信機の順に周波数が割り当てられるよう、染色体の対立遺伝子の値を設定した。

(b) 個体の適応度

個体の適応度を

$$(f_s - \max_{i \in S} \bar{f}_i) + (f_c - \max_{i \in C} \bar{f}_i)$$

で評価し、この値の大きな個体ほど優れた個体とする。ここで*f_s*は全局を対象としたグラフの最大クリークの位数を、*f_c*は干渉地域の基地局のみを対象としたグラフの最大クリークの位数を表す。ここで*f_s*, *f_c*はそれぞれ、基地局全体と干渉地域とで最低限必要となるチャンネル数となるので、適応度0の割当ては理論的に見て最適な割当てとなる。

(c) GAのパラメータ

一世代の個体数を200とし、この中からルーレット選択により180の個体を選び、これに突然変異率0.05の一樣変異を加えた。そして、この新しく生成された180の個体と、元の200個体を合わせた中で、適応度の高い200個体を次世代の個体として選択した。交叉の遺伝的操作は加えなかった。そして、適応度0の個体が見つかるか、世代数が500に達するまで探索を続けた。なお、これらのパラメータの値は、実際に割当実験を行った結果から、探索効率が高い組合せを選択したものである。

3.4 問題への適用結果

実際の電力会社管内の基地局に対する周波数割当問題に開発手法を適用した。開発手法を100回実行したところ、このうちの50回で、全基地局と干渉地域での帯域幅が最大クリークの位数と一致する、理論的に最適な割当てが求まった。また、最適な割当てが求まらなかった50ケースについては、干渉地域での使用周波数の帯域幅は最小となったものの、全体での使用帯域幅のチャンネル数が1だけ増えた。200個体を500世代まで進化させるのに要する計算時間は、Pentium II 333 MHzのパーソナルコンピュータで約260秒であるので、100回の実行中50回理論的に最適な割当てが求まったこの計算では、平均的には520秒以下の計算で理論的に最適な基地局への周波数割当てを求めることができたことになる。

4. むすび

本稿では電力用移動無線システムにおける二つの課

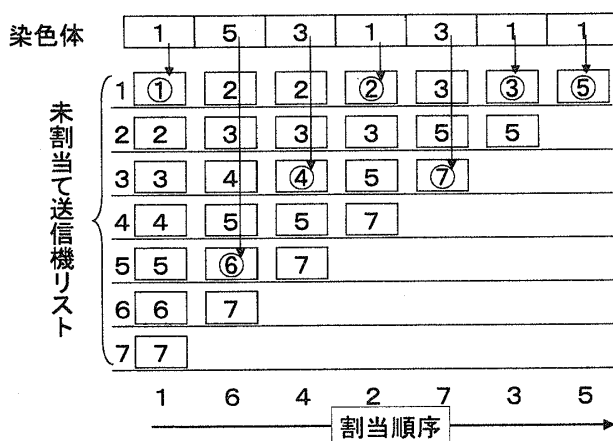


図7 染色体と送信機への割当順序

題に対して検討を行った。第一に、各基地局で必要となるチャンネル数の算定方法について検討を行い、チャンネルの利用がピークとなる復旧作業時を対象に、規定時間内に復旧可能な箇所数から必要チャンネル数を算定する方法を開発した。第二に、利用周波数の帯域幅が最小となる、各基地局への最適な周波数割当てを求め手法について検討し、利用可能な周波数のうち、チャンネル番号が最小となるものから割り当てていく貪欲アルゴリズムを基本に、GAにより最適な割当順序を探索する新たな割当手法を開発した。

参考文献

- [1] D. Bertsekas and R. G. Gallager, "Data Networks", Prentice-Hall, Inc., 1987, 日本語訳「データネットワーク」, オーム社, 八星禮剛 監訳
- [2] 北野宏明(編): 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 東京, Jun. 1993.
- [3] 伊庭斉志: 遺伝的アルゴリズムの基礎~GAの謎を解く~, オーム社, 東京, Sep. 1994.
- [4] E. Gelenbe and I. Mitrani, "Analysis and Synthesis of Computer Systems", Academic Press Inc., 1980, 日本語訳「計算機システムの解析と設計」, オーム社, 秋丸春夫, 橋田 温 監訳
- [5] D. P. Heyman and M. J. Sobel, "Handbooks in Operations Research and Management Science Vol. 2 STOCHASTIC MODEL", Elsevier Science Publishers, 1990, 日本語訳「確率モデルハンドブック」, 朝倉書店, 伊里正夫, 今野 浩, 刀根 薫 監訳
- [6] 所 健一, 松井正一他, 「GAによる移動無線基地局への周波数割当ての最適化」, 電気学会通信研究会資料 CMN-00-6, Jan. 2000
- [7] R. Carraghan and R. M. Padalos, "An exact algorithm for the maximum clique problem", *Oper. Res. Lett.*, vol. 9, no. 6, pp. 375-382, Nov. 1990.