

超導出による状態空間問題解法のCDMA同期補足への適用

安藤類央 武藤佳恭
慶應義塾大学政策メディア研究科
〒2520816 神奈川県藤沢市遠藤5322
{ruo,takefuji}@sfc.keio.ac.jp

あらまし 本論文では、DS-CDMAにおける同期補足の計算コストを下げるための、状態空間問題を適用した手法について述べる。提案手法では、同期の取れたPN系列を含むK個のシーケンスを4つのクラスに分割し、適切な遷移公理を設定し、測定ごとにそれぞれのクラスの状態遷移を導出することで、 K/N ($N = 2, 3, 4$) 回以内の測定で同期位置の探索を行うことができる。評価実験では、K個の系列をいくつかのグループに分割し、状態空間問題解の計算コストと、内積値を測定し、提案手法の有効性を検討した。

Formulation state-space problem using hyperresolution for DS-CDMA code acquisition

Ruo Ando Yoshiyasu Takefuji
Graduate School of Media and Governance, Keio University,
5322 Endo Fujisawa, Kanagawa, 252 Japan
{ruo,takefuji}@sfc.keio.ac.jp

Abstract: In this paper we propose a formulation of state-space problem for DS-CDMA code acquisition. In proposal system, K sequences are divided into four classes, of which acquired PN sequence. FOL proving using SoS (Set of Support) and hyper resolution provides effective search for the transition of four classes lead to peak-detection within $K/3$ times of measurement. Our system is evaluated by the cost of proving state-space problem and calculating inner product of some groups gathered from K sequences. It is showed that proposal method is effective if K sequences is divided into about 4-8 groups.

1 はじめに

CDMA(Code Division Multiple Access)は、拡散符号と呼ばれる多重通信の方式の一種で、FDMA、TDMA と比べて、同一の周波数と時間領域において複数のユーザに符号を割り当て、受信側で符号を識別することで多重化を可能にする。送信信号にくらべて高速な拡散符号を乗じたのち、搬送波で変調して送信する。そのため、周波数大域が大きくなるが、結果として1つの利用周波数大域を符号の数だけのユーザが同時に通信できる。また、高伝送大域に信号が拡散するため、情報の秘匿性と雑音耐性に特性をもつ。

CDMA では、同一周波数帯を利用して拡散符号の数だけユーザが通信を行うことができる反面、拡散符号同期の精度が非常に重要な要素となる。つまり、より多くのユーザが通信を行うためには、拡散符号の相互相関を低くして干渉を抑える必要があり、そのためには符号間同期の精度を上げる必要がある。拡散符号による通信は、相互相関を小さくなる位相差にあわせることで性能が向上する。また、CDMA を

用いた通信では、拡散符号の位相や動作クロックの発生タイミングを、送信受信側双方で正しく同期されることで、変調された信号を正確に復調することが重要になる。これは、上述した符号間同期とは別にチップ同期と呼ぶ。チップ同期技術は同期補足と保持(追跡)の2つから構成され、送信側の位相とタイミングを受信側が正しく生成する機能であるため、受信機の性能や回路規模を左右する重要な要素である。本論文では、チップ同期補足について扱う。同期補足は、受信した拡散符号系列の発生タイミングを、1チップ時間程度の精度で求める。直接拡散方式における同期補足の手法は、マッチドフィルタとシリアルサーチに分類される。シリアルサーチ[1][2]は、同期位置を1チップずつ逐次探索していく。マッチドフィルタ[3]は、すべての同期位置を一度に検索する。

2 提案手法

同期補足には、シリアルサーチ[1][2]とマッチドフィルタ[3]があるが、提案手法では同2手法と比べ、計算コストを少なくすることができ

る。後述する状態空間分析に即すると、本論文で扱う同期補足は、以下のように定式化することができる。

H個のPN系列(M系列)の中から、相関値が最高(-1/1)になる系列がある。ここで、H/N回(N=2,3,4)以内の内積測定でこの系列を探す方法を探すことができるか。対象となる系列については、内積測定後は、標準の重さ、標準あるいは軽い、標準あるいは重い、標準あるいは軽いあるいは重い4つのクラスに分類される。ここで、H回以内で標準あるいは軽い、標準あるいは重いクラスに属する系列を1つに絞ることができるか。

上の問題は、状態空間問題として扱うことができ、FOL定理証明にいくつかの計算戦略を適用することで、効率的に解を求めることが可能である。

2.1 状態空間問題

状態空間問題は、1963年に Newell と Simon によって提示された概念[4]で、問題を解く前の状態を初期状態とし、問題が解けた状態を目標状態とする。これから、現在の状態を、目標状態を含んだ状態空間であると解釈する。状態遷移は、制約を記述する遷移公理を適用することで発生する。初期状態から、達成可能な状態へ移行するさまざまな遷移公理を適用することで多くの状態が生成されては除去される。上で定式化した問題は状態空間問題であり、十数もの遷移公理を適用することで達成可能な状態を探索する。

探索対象となる系列については、内積を測定する過程で、1)標準の重さ:S、2)軽いまたは標準:L S、3)重いまたは標準:H S、4)軽いまたは重いまたは標準:H L Sの4つのクラスに分類できる。初期状態では、すべての球は4)のクラスに属する。一回の内積計算からは3回の結果が考えられる。つまり、1)負の内積値が計算される。2)正の内積値が計算される。3)内積値が0に近くなる。の3通りである。

達成可能な状態の判定は、可能な解の数と、残りの測定で起こりうる結果の数の比較で構成される。対象となるM系列に対する可能性の数は、クラスH L Sの系列の数*2+クラスH Sの系列の数+クラスL Sの系列の数である。一方、起こりうる結果の数は、N回の内積計算回数が残っているときに起こりうる結果の数は、内積計算の結果が3通りであることから、 3^N 通りとなる。ここで、M系列のクラス判定についての可能性の数が、起こりうる結果の数より多ければその状態は解けないものとな

り、除去されることになる。本論文では、以上の状態空間問題の定式化を同期補足に適用し、評価実験を行った。

2.2 同期補足手順

本節では、前節の状態空間問題をCDMAの同期補足手順に適用する手順について述べる。状態空間問題で扱える系列の数は、M系列の全体数より少ない必要がある。そのため、M系列の長さ分だけの系列数を、適当な数のグループに分割し、それぞれのグループでのユーザ系列との内積値が最大のものを探索する。以下に、検出手順を示す。

STEP 1 測定方法の決定

K個の系列からJ解の測定で同期している系列を見つけ出す状態遷移を求める。

STEP 2 解の選択

同期している系列を見つけ出す状態遷移をピックアップする。

STEP 3 M系列のグループ化

H個の系列から、内積値が閾値を越えない範囲で、H/I個のM系列を選んで足し合わせ、K個の加算系列を作成する。

STEP 4 状態空間問題の適用

STEP 2で選択した状態遷移に従って、系列間の内積を測定し、STEP 3で作成したK個の加算系列の中から、最大の相関を持つ加算系列を見つける。つまり、K個のグループについて、K個の系列の中から、クラスSのもの、あるいはクラスLSまたはクラスHSのものを識別する。

STEP 5 同期位置の決定

STEP 4で探索した最大の相関を持つ加算系列は、I個の系列を足し合わせたものであるため、I個の系列なかから、内積値が最大のものを決定する。

このようにすると、内積の測定回数は、 $I * (K/N)$ 回(N=2,3,4)以内に留めることができ、シリアルサーチやマッチドフィルタに比較しても、適切な計算コストで解を求めることができる。PN系列をバッファする回路が別途必要になるが、シリアルサーチと同じ、加算回路と内積計算回路で構成できるため、回路規模も適切な大きさに収まるものと想定される。

3 計算戦略

本論文での状態空間問題の解法はいくつかの計算戦略が適用されるが、主に、支持集合戦略と超導出の2つによって構築されているところに特徴がある。

3.1 支持集合戦略

支持集合戦略は1965年にWOS, ROBINSON, CARSONによって提案されたものである[5]。支持集合戦略は制限戦略の1つで、自動推論に目標とする解空間に関係ないところを探索せずに、対象としている問題に集中できるようにする。本戦略は、特定の問題については、多少の専門的知識があればターゲットから遠いところを探索しがちであることが明確であるケースに有効である。ここで部分集合とは、研究中の問題を表す節集合Sの空でない部分集合Tのことを指す。S - Tが充足可能であるとき、TはSの支持集合である。このとき、支持集合に属さない節同士では導出を行わず、支持集合に属する節との間で導出を行う方針を、支持集合導出法という。

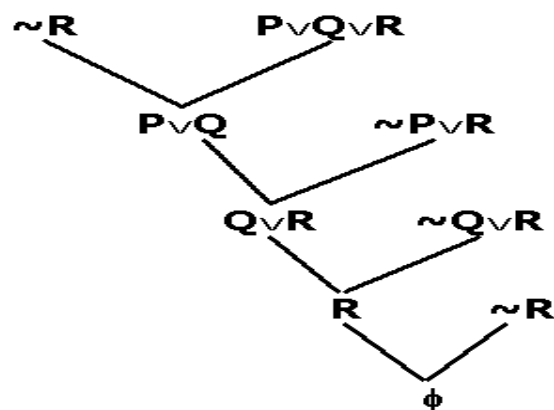


図1 支持集合戦略の反駁グラフ

支持集合戦略は1965年にWOS, ROBINSON, CARSONによって提案されたものである。節集合Sから、Sの部分集合Tを除いた集合S - Tが充足可能であるとき、TをSの支持集合という。また、少なくとも1つの支持集合の節から得られた導出形も支持集合である。このとき、支持集合に属さない節同士では導出を行わず、支持集合に属する節との間で導出を行う。このような方法を支持集合導出法という。ところで、節集合Sの支持集合をTとすれば、S - Tを充足する解釈は存在し、その解釈に対して、Tは値をとる。したがって支持集合戦略は基本的に意味集合導出を同じであるといえよう。

3.2 超導出

超導出は1965年にROBINSONによって提唱された手法[6]で、通常の導出系の方法には1対の節から順次導出を行うのに対し、2個以上の節に対して導出を行う。超導出の意味は、何段階もの2項導出にあたる作業を1つにまとめたもので、通常の2項導出に比べて、多くの導出が起こるということを目指す。具体的には、導出の対象が、1つだけ負節または混合節で、残りの正節との集合から新しい正節を作る作業である。ここで、負節または混合節で、残りの正節は負節または混合節中の負リテラルの数と等しい必要がある。節の集合の中の正節は衛星といい、負リテラルを含む節は核と呼ばれる。核のリテラルは対応する衛星のリテラルと対になり、負リテラルが対になっているリテラルと同じ述語を持ち、それぞれについて単一化できなければならない。

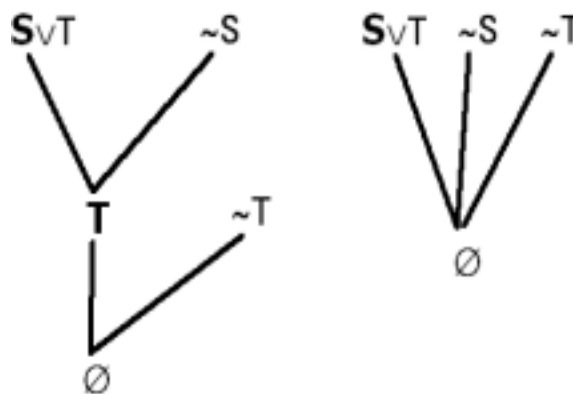


図2 超導出の反駁グラフ

図2は、節集合M = {S, T, ~S, ~T}の反駁グラフである。超導出は意味的導出の一種であり、例えば、すべてのリテラルが否定を含まないとする、N = {S, T, U}とすると、超導出は意味的導出である。先行研究では、特定の問題については、UR導出や2導出を適用するよりも効果的な計算を行うことが示されている。

4 評価実験

4.1 状態空間問題

今回、定理証明系には、アルゴン又国立研究所で開発された、Otter(Organized Techniques for Theorem-proving and Effective Research)を用いた。同ソフトウェアは、一階述語論理の定理証明系には安定した性能を示していることで知られており、ベンチマークとして比較評価されることが多い。

表1は、16のシーケンスの中から、各ユーザのPN系列との内積値が最大のものを見つ

けるための測定方法を探索した際の計算コストである。また、表2は、32のシーケンスの中から、内積値が最大のものを見つけるための測定方法を探索した際の計算コストである。計算コストについては、系列数が受信側でわかっていることを前提に、あらかじめ計算できるため、CPU時間に関しては特に問題はないと思われる。また、実験は500MHzのCPUを搭載したLinuxマシンで行った。

処理した節の数	5605
生成した節の数	21696
等価代入の回数	178926
包摂された節の数	16084
保持された節の数	5604
解の数	16
ユーザCPU時間(sec)	259.7
システムCPU時間(sec)	0.65

表1 系列数16の計算コスト

処理した節の数	17773
生成した節の数	69478
等価代入の回数	573078
包摂された節の数	51692
保持された節の数	17772
解の数	34
ユーザCPU時間(sec)	4127.54
システムCPU時間(sec)	1.33

表2 系列数32の計算コスト

4.2 内積測定結果

上述している状態空間問題を同期補足に適用するには、複数の系列を足し合わせて内積を測定する必要がある。今回は、128長のPN系列を、3ユーザが受信するケースを元に、実験を行った。表は、PN系列を、8系列ごとに足し合わせ、16グループを作成し、ユーザごとに内積を測定した結果である。同期している系列が入っているグループと、同期していない系列を足し合わせたグループについて、符号の違いも含め、おおむね良好な結果が出た。しかし、本ケースでは±40程度が閾値であると考えられ、+40以上の内積値がでるグループが1個あったため、16グループ以上の分割が必要であることが明らかになった。表は、PN系列

を4系列ごとに足し合わせ、32グループを作成し、内積値を計算した結果である。また、図3は、個々のグループの内積値を図示したものである。グループ番号1が同期している系列を含むグループであり、他は、同期のとれていない系列を足し合わせたグループである。32分割した場合、個々のグループすべての出力について、閾値を±40程度の設定すれば、提案手法は有効に機能することが確かめられた。

	ユーザ1	ユーザ2	ユーザ3
同期している系列	-44	-52	-36
その他の系列(平均)	18.7	19.87	17.73

表3 8系列*16グループの内積測定結果

	ユーザ1	ユーザ2	ユーザ3
同期している系列	-78	-46	-70
その他の系列(平均)	9.29	7.8	11.8

表4 4系列*32グループの内積測定結果

5 まとめと今後の課題

本論文では、DS-SS-CDMAにおける同期補足の計算コストを下げるための測定方法を、状態空間問題の概念を導入することで定式化した。提案手法を用いると、同期の取れたPN系列を含むK個のシーケンスを4つのクラスに分割し、適切な遷移公理を設定し、測定ごとにそれぞれのクラスの状態遷移を導出することで、 K/N ($N=2, 3, 4$) 回以内の測定でピークディテクトを行うことができる。同状態空間問題には、FOL定理証明系を適用し、超導出と支持集合戦略を用いることで効率的な測定方法の探索を行った。評価実験では、128長のPN系列をシフトさせ、K個の系列を生成した後、K個の系列をいくつかのグループに分割し、各ユーザが持つPN系列との内積値を計算した。その結果、適切なサイズでK個の系列群が分割されていれば、提案手法は有効に適用できることが確かめられた。

今後の課題としては、PN系列長を拡大し、より現実的なCDMA環境で提案手法の評価実験を行うことが考えられる。また、提案手法をVHDLなどのハードウェア記述言語で記述し、ゲート数など別観点から評価を行う余地が残っている。

4系列 * 32グループの内積測定結果

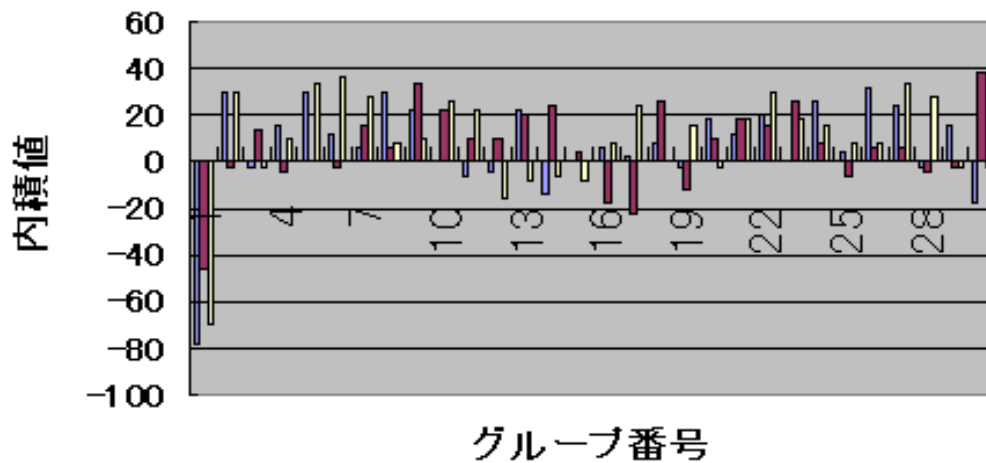


図3 4系列ごとに加算した32グループの内積値の計算結果

参考文献

- [1] M.M. Mustapha and R.F. Ormondroyd, "Performance of a serial-search synchronizer for fiber based optical CDMA system in the presence of multi-user interference", Proc. SPIE, vol. 3899 pp. 297-306 Nov. 1999
- [2] Abtin Keshavarzian and Jawad A. Salehi, "Optical Orthogonal Code Acquisition in Fiber-Optic CDMA Systems via the Simple Serial-Search Method," IEEE Transaction on Communications, vol. 50, no. 3, March 2002.
- [3] M.M. Mustapha and R.F. Ormondroyd, "Dual-threshold sequential detection code synchronization for an optical CDMA

- network in the presence of multi-user interference", IEEE J. Lightwave Technol, Vol 18, pp 1742-1748, Jun 2000.
- [4] A. Newell & H. Simon, "GPS, a program that simulates human thought", In E. Feigenbaum and J. Feldman, editors, Computers and Thought, pages 279-293. McGraw Hill, New York, 1963.
- [5] Wos, L.; Robinson, G.; Carson, D., "Efficiency and completeness of the set of support strategy in theorem proving" J. ACM 1965 pp. 536-54
- [6] Larry Wos: The Problem of Explaining the Disparate Performance of Hyperresolution and Paramodulation Autom. Reasoning 4(2): 215-219