スペクトル拡散方式を用いた車車間通信・測位統合システム

非会員 水 井 潔 (関 東 学 院 大)

Vehicle-to-Vehicle Communication and Location System using Spread Spectrum Technique

Kiyoshi Mizui, Non-member (Kanto Gakuin University)

In recent years, the development of ITS (Intelligent Transport Systems) is promoted. In many systems for ITS, vehicle-to-vehicle communication systems and ranging systems are very important. A vehicle can automatically get the information of surrounding vehicles by vehicle-to-vehicle communication systems. And it can measure distances among their vehicles by ranging systems. It is inefficient from the view of economy and effective use of transmission medium that a vehicle has two systems separately. Therefore, Vehicle-to-Vehicle Communication and Ranging System using Spread Spectrum Technique called Spread Spectrum (SS) Boomerang Transmission System has been proposed. In this system, a vehicle (Vehicle-A) transmits its PN code to another vehicle (Vehicle-B). Vehicle-B replies the PN code adding its information. And Vehicle-A gets the information of Vehicle-B and the distance between vehicles. However, this system cannot measure the location of Vehicle-B because each vehicle has one pair of receiver and transmitter. In this paper, we propose Vehicle-to-Vehicle Communication and Location System using SS Technique. In the proposed system, Vehicle-A has two receivers on each side of it. And the received signals of Vehicle-A have the phase difference related to position of Vehicle-B. So, Vehicle-A cannot get only the information of Vehicle-B and the distance between vehicles but also the location of Vehicle-B.

キーワード：高度道路交通システム，ITS，車車間通信，車載用レーダ

1. ま え が き

自動車を中心とした道路交通などの交通システムは現代生活において必要不可欠な社会基盤である。より安全，より快適，より環境に優しい交通システムの構築を目指して，ITS (Intelligent Transport Systems: 高度道路交通システム) の研究・開発が日本をはじめ世界中で行われている⁽¹⁾。

ITS の研究・開発分野は多種多様あるが，その中に車車間通信システム (車両間通信システム) と車間距離測定システム (測距システム) に関する分野がある⁽²⁾。

車車間通信システムは，各車両に通信機を搭載し，各車両のブレーキ情報，ステアリング情報，アクセル情報，速度情報などの情報をレーザ光やミリ波などを利用した無線通信技術で直接的に送受しあうためのシステムであり，車間距離測定システムは，各車両に車載用レーダなどを搭載し，近隣に走行する車両との距離を測定し，車両配置を把握するためのシステムである。いずれも，事故を未然に防ぐだけでなく，円滑で快適な運転を可能にする技術といえる。

ここで，車車間通信システムと車載用レーダの二つを各

車両が別々に搭載することを考える。この場合は測距を行っている対象と通信の対象が一致しない場合を想定して複雑な制御を行う必要があり，信頼性に欠けてしまう。更に，装置的にも電波や光といった伝送媒体の有効利用の点でも大変に不経済である。そこで，車車間通信と車間距離測定を一つのシステムと一つの伝送媒体で同時に行うことができるブーメラン方式と呼ばれるスペクトル拡散方式を用いた車車間通信・測距統合システムが提案されている^{(3)~(5)}。

本論文では，スペクトル拡散方式を用いた車車間通信・測位統合システムを提案する⁽⁶⁾⁽⁷⁾。本システムはブーメラン方式に三角測量の原理を応用し，従来のブーメラン方式の車車間通信・測距機能に加えて，対象車との相対的角度測定が行えるシステムである。これにより，従来のブーメラン方式では行えなかった対象車の相対的車線判定が行える可能性ができ，より効率的なシステムが構築できるものと思われる。ここで，本提案システムを測位ブーメラン方式と呼ぶことにする。

本章に続き 2. では従来のブーメラン方式について述べる。3. では提案する測位ブーメラン方式について説明し，4. で計算機シミュレーションの結果を報告する。

図 1 ブーメラン方式の概念図

Fig. 1. Concept figure of boomerang transmission system.

2. ブーメラン方式

本章では従来のブーメラン方式について説明する。図 1 にブーメラン方式の概念図を示す。ブーメラン方式はスペクトル拡散方式 (SS 方式)⁽⁸⁾ が通信にも測距にも利用できることに着目し、A 車において、B 車の情報を得るとともに車間距離 AB を測定できる方式である。

簡単にシステムの信号の流れを説明する。

A 車から送出された PN 信号 (PN) に B 車が自車両の速度やブレーキ、ステアリングなどの様々な情報 (DATA) を乗算 (スペクトル拡散変調) し、A 車に送り返す。A 車は自車が所有する PN を用いて受信信号を逆拡散 (スペクトル拡散復調) し、B 車情報 (DATA) を復調すると同時に、送受する PN 符号の位相差から信号の往復時間を測定し、車間距離を算出する。

本方式では、A 車は自車の有する PN 符号のみで B 車の情報を得ることができ、B 車は受信する A 車からの信号に含まれる A 車の PN 符号を復調・識別することなく自車情報 DATA を A 車に送ることができる。また、SS 方式を採用しているため、耐干渉特性に優れている。従って、自律分散型車車間通信ネットワークに適していると考えられる。

ブーメラン方式の有効性は計算機シミュレーションにより確認されており⁽³⁾⁽⁴⁾、また、伝送媒体に超音波を用いた試作機によりその実現性が証明されている⁽⁵⁾。

3. 測位ブーメラン方式

本章では、2. で説明したブーメラン方式に三角測量の原理を応用して対象車の相対的角度を測定できる測位ブーメラン方式と呼ぶスペクトル拡散方式を用いた車車間通信・測位統合システムを提案する。

図 2 に測位ブーメラン方式で用いる角度測定の原理を示す。図 2(a) に示すように従来のブーメラン方式の A 車が送信用・受信用のアンテナを各 1 本ずつ近接して配置するのに対し、提案する測位ブーメラン方式の A 車では (b) 図または (c) 図のように送信用あるいは受信用アンテナを複数、間隔を開けて配置するのが特徴である。これにより、A 車から発信される PN 符号というブーメランが B 車を經由して A 車の受信アンテナに戻るまでの行路差が生じ、この行路差から相対的角度が計算できる。A 車

(a) 従来方式 (b) 中央送信型 (c) 左右送信型
● 送信アンテナ □ 受信アンテナ
■ 送信アンテナと受信アンテナのペア

図 2 角度測定原理図

Fig. 2. Concept figures of angle measurement.

でのアンテナ配置は多数考えられるが、本研究では図 2(b) に示す中央送信型と (c) に示す左右送信型について検討した。いずれの型でも B 車は従来のブーメラン方式と同様に送信用・受信用のアンテナを各 1 本ずつ近接して配置することにする。

(b) 図の中央送信型の信号は、A 車の中央送信アンテナから B 車の中央アンテナを經由して A 車の左右の受信アンテナに戻ってくる。従って、左右の信号の行路差は、B 車の中央アンテナから A 車の左右の受信アンテナまでのそれぞれの片道分だけで測定されることになる。一方、(c) 図の左右送信型では、左右で別々な PN 符号を用いることで、A 車の左受信アンテナで受信される信号の行路は A 車の左アンテナと B 車の中央アンテナとの往復であり、A 車の右受信アンテナで受信される信号の行路は、A 車の右アンテナと B 車の中央アンテナとの往復となる。そこで、左右の信号の行路差は、B 車の中央アンテナから A 車の左右のアンテナまでのそれぞれの往復分で測定されることになる。従って、距離分解能による丸め誤差が測定距離に含まれることを考慮すると、左右送信型のほうが中央送信型よりも精度良く行路差を測定でき、結果的に左右送信型のほうが、測位特性が良くなると考えられる。なお、角度計算方法の詳細は付録に示す。

4. 計算機シミュレーション

3. で提案した測位ブーメラン方式の有効性を計算機シミュレーションで確認した。本章ではその結果について述べる。

〈4・1〉 シミュレーション用ブロック図 3. で説明した測位原理に基づき中央送信型および左右送信型のシミュレーションを行った。図 3 にシミュレーション用 A 車ブロック図を示す。図中の破線で囲った送信部、受信部および測距部と B 車の各部のブロック図は図 4 に示す従来のブーメラン方式のブロック図での各部分と同じ構成である。

今回のシミュレーションはシステムの基本特性を評価し、システムの有効性を確認することを目的にしているの

図 3 測位ブーメラン方式シミュレーション用 A 車ブロック図

Fig. 3. Block diagrams of vehicle-A of location boomerang transmission system for simulation.

図 4. Block diagram of conventional SS boomerang transmission system for simulation.

で、簡単な BPSK 変調で行い、搬送波同期はとれているものと仮定し同期検波を採用した。位相変動やフェージングの影響は考慮していない。また、受信信号は適当なレベルまで AGC 付き増幅器により増幅した。

また、A 車での SS 復調は、逆拡散用 PN 符号発生器と乗算器による逆拡散で行うこととした。逆拡散用 PN 符号発生器のチップ同期引込みは PN マッチドフィルタのピーク検出に行っている。すなわち、PN マッチドフィルタの出力値がスレッショルドレベルを超えたときピークと判定し、ピークが検出されたとき逆拡散用 PN 符号発生器内のシフトレジスタの値を初期値にリセットすること

で同期引込みを実現している。

更に、距離測定用のカウンタのリセットパルスは、送信用 PN 符号発生器内のシフトレジスタの値が初期値になったときに発生させ、また、ストップパルスは逆拡散用 PN 符号発生器内のシフトレジスタの値が初期値になったときに発生させた。そして、リセットパルスからストップパルスまでのカウンタの値を用いて次式により測定距離 R を算出した。

$$R = \frac{2N_c f_c}{C} \dots \dots \dots (1)$$

(1) 式において、 N_c はカウンタの値、 f_c はカウンタのク

ロック周波数, C は光速 ($=3.0 \times 10^8$ m) を意味する。

使用する PN 符号の数は中央送信型では 1 種類, 左右送信型では左右別々に使用するために 2 種類である。今回の左右送信型のシミュレーションでは PN 符号発生器のシフトレジスタの初期値を変えることで, 一つの符号系列の位相を 2 分の 1 周期ずらして左右の PN 符号に使用した。

〈4・2〉 シミュレーション条件 表 1 に今回のシミュレーションの諸条件を示す。

ここで, 距離分解能は 0.1, 0.2, 0.5 および 1.0 m とし, 送信用 PN 符号と逆拡散用 PN 符号との位相差をそれぞれ 1/100, 1/50, 1/20 および 1/10 chip 単位で検出した。最大測定表示は 150 m とした。また, データ判定は左右どちらの受信機でも行えるが, 今回は右側受信機の復調データを用いてビット誤り率 (BER) を求めた。

各車両は車線の中央を走行しているものとし, 使用する各アンテナは無指向性とした。更に, B 車における処理遅延は無視した。B 車における処理遅延は測位精度に大きく影響すると思われるが, その統計的な遅延量を B 車情報に加えることにより, A 車で測位結果の補正が可能になると考えている。

また, A 車から B 車および B 車から A 車への伝搬による電力減衰は距離の 2 乗に反比例することとした。

〈4・3〉 伝送路が理想的な場合の特性 まず, 図 5 に示すようなシミュレーションモデルで干渉波が混入しない理想的な伝送路における測定角度特性をシミュレーション

表 1 シミュレーション条件
Table 1. Simulation conditions.

変調方式	DS/BPSK
PN符号	127chipM系列
チップレート	15Mchip/sec
ビットレート	118.1kbit/sec
拡散率	127
搬送波周波数	750MHz
車線幅	3m
車幅	1.8m
距離分解能	0.1m, 0.2m, 0.5m, 1.0m
最大測定表示距離	150m
干渉波	他のPN信号

図 5 理想的な場合のシミュレーションモデル
Fig. 5. Simulation model in cases without interference.

した。図 6(a) に中央送信型の, (b) に左右送信型の結果をそれぞれ示す。図中のパラメータは分解能を示している。

図 6 より, 理論値に最も近似しているのは左右送信型の分解能 0.1 m, 次いで中央送信型の分解能 0.1 m であることが確認できる。分解能が 0.2 m の場合, 中央送信型では車間距離 R が 15 m まで, 左右送信型では 30 m までは理論値に近い値を示すが, それ以上の車間距離になると測定角度 0 deg または中央送信型では 12.9 deg, 左右送信型では 6.4 deg を示す。分解能 0.5 m の場合は, 左右送信型では車間距離 R が 7.5 m 以上で 16.1 deg, 中央送信型では車間距離にかかわらず 33.8 deg を測定しており, 分解能 1.0 m では測定される角度に信頼性がないことが確認できる。このように設定車間距離 R により測定角度 θ が 0 deg や分解能に依存する最小値になるのは分解能による丸め誤差の影響による。A 車中央送信アンテナ, または左右の送信アンテナから発信された信号が B 車を經由して A 車左右受信アンテナに到達するまでの行路を左右の測距部で測定するが, この際に分解能に依存する丸め誤差が発生する。この丸め誤差により, 左右測距部での測距結果が理論値で差異があるにもかかわらず同一になれば 0 deg と角度計算され, 分解能 1 単位分だけ行路差が検出さ

図 6 理想的な場合の測定角度特性
Fig. 6. Measured angle performance in cases without interference.

れば最小値を指示することになるわけである。

以上の結果より、左右の受信アンテナで受信される送信アンテナからの信号の行路差が大きい左右送信型のほうが中央送信型よりも優れていることが確認できる。また、分解能による丸め誤差によって測定角度には誤差が生じ、分解能が高いほど誤差が小さく特性が良いことがわかる。近距離での相対的車線判定などに本システムを用いる場合は距離分解能が0.2 m程度は必要と思われる。

〈4・4〉 干渉が存在する場合の特性 次に、伝送路上で干渉波が加わった場合の特性を図7に示すようなモデルでシミュレーションした。図7(a)は干渉波車両が対向車である場合、(b)は干渉波車両がB車と同一車線を走行している場合を設定している。A車とB車の車間距離 R を30 m、距離分解能を0.1 mで一定とし、干渉波車両からA車またはB車までの干渉波車間距離 X を変化させた。この場合、A車から見たB車の相対的角度は5.7 degとなる。干渉波車両は中央送信型を仮定し、一波のPN信号を送信しているものとした。また、希望波と干渉波の位相関係はランダムになるはずであるが、今回は位相の影響が最大に出るとと思われる同相または逆相で加算するようにシミュレーションした。

シミュレーション結果を図8、図9に示す。ここで、A車に干渉が加わった場合(図8)の信号対干渉波電力比(S/I)の計算における信号電力 S は、A車右受信アンテナで受信するB車からの信号の電力で求めた。B車に干渉が加わった場合(図9)は、中央送信型のときはA車

中央アンテナからの信号の電力で求め、左右送信型のときはA車の左右の送信アンテナから到来する2波の和信号の電力で計算した。また、(b)図の測定距離 R 、(c)図の測定角度 θ は各々の干渉波車間距離 X における5,000 bitの平均測定値である。

まず(a)図の S/I 特性を図8、図9で比較してみると、併走車からB車に干渉が加わった場合の左右送信型がほかの場合に比べて干渉波車間距離 X に対して特性が約3 dBほど良い。これは、左右送信型のB車での受信信号がA車右送信アンテナおよび左送信アンテナから発信された二つの信号を受信し、その合計電力を S 信号としているからである。(b)図の BER 特性、(c)図の測距特性、

(a) 対向車からA車に干渉が加わる場合 (b) 併走車からB車に干渉が加わる場合

図7 干渉波が存在する場合のシミュレーションモデル

Fig. 7. Simulation model in cases with interference.

図8 A車に対向車から干渉が加わった場合の特性

Fig. 8. Performance in cases with interference from opposite lane to vehicle-A.

図 9 B 車に併走車から干渉が加わった場合の特性
Fig. 9. Performance in cases with interference from same lane to vehicle-B.

(d)図の測定角度特性については、中央送信型のほうが左右送信型よりも優れていることがわかる。これは、左右送信型では左右別々の PN 符号を用いて測距を行っており、それぞれの受信アンテナで受信される信号中には希望信号以外に必ず干渉成分となるもう片方の信号が含まれているためである。特に、対向車から A 車に干渉が加わった場合の左右送信型が干渉波車間距離 X に対して特性が劣ることが確認できるが、これは図 7(a)の車両配置の場合、右受信アンテナで受信される信号のうち、希望信号である右送信アンテナから発信された信号成分よりも干渉成分となる左送信アンテナから発信された信号成分のほうが、伝搬距離が短いので、大きいためである。なお、(d)図の測定角度特性をみると、干渉の影響のない干渉波車間距離 X においても、分解能 0.1 m による丸め誤差の影響で測定角度が理論値と一致していないが、この誤差は車線判定などには影響しない程度の値と考えている。

以上のシミュレーション結果から、提案した中央送信型、左右送信型のいずれもある程度の干渉が存在する環境下でも通信と同時に車間距離測定および相対角度測定が可能であることが確認され、左右送信型は中央送信型と比較して測定角度特性には優れるが耐干渉特性ではやや劣ることがわかった。また、距離分解能が測定角度特性に影響を与えることも確認され、距離分解能が高いほど角度特性が良いことがわかった。

5. むすび

本論文では、スペクトル拡散方式を用いた車車間通信・測位統合システムを提案した。本システムはブーメラン方式と呼ばれるスペクトル拡散方式を用いた車車間通信・測距統合システムに三角測量の原理を応用し、従来のブーメラン方式の車車間通信・測距機能に加えて、対象車との相対的角度測定が行えるようにしたシステムである。計算機シミュレーションの結果、ある程度の干渉が存在する環境下でも通信と車間距離測定および相対角度測定が可能であることが確認された。

今後の課題として、まず、事故防止と円滑で快適な運転の実現を主たる目的とした本システムが干渉により通信誤りおよび測距、角度測定誤差が生じていることは望ましいことではないので、耐干渉特性を向上させる手法の検討があげられる。更に、ミリ波などの無線の使用を前提とし、位相変動やフェージング、マルチパス、アンテナの指向性、路面反射などを考慮したシミュレーション、車両配置や車両形状、アンテナ配置の影響の検討などが必要と思われる。

謝 辞

日頃よりお世話になる慶應義塾大学理工学部 中川正雄教授に深謝いたします。また、基本プログラミングなどデータ収集に協力いただいた本学卒業生 増田幸絵氏に感謝

いたします。

(平成 12 年 2 月 1 日受付, 同 12 年 6 月 1 日再受付)

文 献

- (1) 建設省道路局 ITS ホームページ (<http://www.nihon.net/ITS/j.html/index.html>)
- (2) 水井 潔:「ITS における無線技術の現状と課題」, 1999 年電気学会全大, S21-3 (平 11-3)
- (3) 水井 潔・内田雅敏・陰山興史・中川正雄:「スペクトル拡散方式を用いた車両間通信・測距統合システム」, 信学技報, SST 91-20, 29~34 (平 3-8)
- (4) 水井 潔・内田雅敏・中川正雄:「スペクトル拡散方式を用いた車両間通信・測距統合システム」, 信学論, J78-B-II, no. 5, 342~349 (平 7-5)
- (5) 増田幸絵・水井 潔:「スペクトル拡散方式を用いた超音波通信・測距統合システムの試作」, 1996 年信学会基礎・境界ソダ, A-132 (平 8-9)
- (6) 増田幸絵・水井 潔:「スペクトル拡散方式を用いた車両間通信・測距統合システム」, 信学技報, SST 97-20, 1~6 (平 9-7)
- (7) S. Masuda and K. Mizui: "Vehicle-to-Vehicle Communication and Location System using Spread Spectrum Technique", 1998 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '98), 1775~1779, Ottawa, CANADA (1998-5)
- (8) 丸林 元・中川正雄・河野隆二:「スペクトル拡散通信とその応用」, 電子情報通信学会 (平 10-10)

付 録

角度計算方法

付図 1 を用いて図 2(b) の中央送信型の行路差計算方法を説明する。

付図 1 において, B は B 車の送受信アンテナを, C は A 車の送信アンテナを, L は A 車の左受信アンテナを, R は A 車の右受信アンテナをそれぞれ意味する。いま, C は LR の中点になるように配置する, すなわち,

$$LC = CR \quad \text{.....(A.1)}$$

とし, 角度 θ の表示は左回りを正方向 (+ 方向) とする。中線定理より

$$BR^2 + BL^2 = 2(RC^2 + BC^2) \quad \text{.....(A.2)}$$

となる。中央送信型の左受信機では $C \rightarrow B \rightarrow L$ と通った PN 信号の送受の位相差から距離 l を測定し, 右受信機では $C \rightarrow B \rightarrow R$ と通った PN 信号の送受の位相差から距離 r を測定する。これより,

$$l = CB + BL \quad \text{.....(A.3)}$$

$$r = CB + BR \quad \text{.....(A.4)}$$

(A.1) 式, (A.3) 式, (A.4) 式を (A.2) 式に代入することで次式が得られる。

付図 1 角度計算説明図

app. Fig. 1. Concept figure of angle computation.

$$CB = \frac{r^2 - l^2 - \frac{LR^2}{2}}{2r + 2l} \quad \text{.....(A.5)}$$

また, B から LR におろした垂線の足を M とすると, 三平方の定理より,

$$BR^2 - BM^2 = (CR + CM)^2 \quad \text{.....(A.6)}$$

$$BL^2 - BM^2 = (CL - CM)^2 \quad \text{.....(A.7)}$$

となる。(A.1) 式, (A.6) 式, (A.7) 式より

$$BR^2 - BL^2 = 2LR \cdot CM \quad \text{.....(A.8)}$$

が得られ, $BR = r - CB$, $BL = l - CB$ を (A.8) 式に代入して

$$CM = \frac{(r - CB)^2 - (l - CB)^2}{2LR} \quad \text{.....(A.9)}$$

となり, 左受信機での測定距離 l と右受信機での測定距離 r および (A.5) 式, (A.9) 式より A 車と B 車の横方向の相対距離 CM が計算でき, (A.5) 式, (A.9) 式の結果を次式に代入することで A 車と B 車の相対角度が求まる。

$$\theta = \sin^{-1} \frac{CM}{CB} \quad \text{.....(A.10)}$$

次に, 付図 1 を用いて図 2(c) の左右送信型の行路差計算方法を説明する。

左右送信型では, B は B 車の送受信アンテナ, C は A 車の車幅の中心, L および R は A 車の左および右の送受信アンテナをそれぞれ意味する。

左右送信型の左受信機では $L \rightarrow B \rightarrow L$ と通った PN 信号の送受の位相差から往復距離 $2l$ を測定し, 右受信機では $R \rightarrow B \rightarrow R$ と通った PN 信号の送受の位相差から往復距離 $2r$ を測定する。これより,

$$l = BL \quad \text{.....(A.11)}$$

$$r = BR \quad \text{.....(A.12)}$$

(A.1) 式, (A.11) 式, (A.12) 式, を (A.2) 式に代入することで次式が得られる。

$$CB = \frac{l^2 + r^2 + \frac{LR^2}{2}}{2} \quad \text{.....(A.13)}$$

また, 三平方の定理より, 中央送信型と同様に (A.6) 式~(A.8) 式が成立する。(A.8) 式より,

$$CM = \frac{r^2 - l^2}{2LR} \quad \text{.....(A.14)}$$

となり, 左受信機での測定距離 l と右受信機での測定距離 r および (A.14) 式より A 車と B 車の横方向の相対距離が計算できる。(A.13) 式, (A.14) 式の結果を (A.10) 式に代入することで A 車と B 車の相対角度が求まる。

水 井 潔 (非会員) 1961 年 4 月 3 日生。85 年慶應義塾大学電気工学科卒業。91 年同博士課程了。工博。同年関東学院大学電気工学科専任講師。95 年同電気・電子工学科助教授。ITS 通信の研究に従事。平成 6 年度電子情報通信学会学術奨励賞受賞。(共著)「パーソナル通信とコンシューマ通信」がある。