

一种卫星通信的突发传输同步算法

陈昊¹, 乔凯¹, 童业平²

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094; 2. 中国电子科技集团公司第七研究所, 广东广州 510000)

摘要: 在卫星移动通信中应用突发扩频技术实现终端的全球随遇接入有重要的应用价值. 针对突发通信时间极短、突发时刻随机和卫星移动通信信道带宽窄等条件, 以及保障安全可靠的接入和传输更多有效信息的需求, 本文提出了一种采用私有、随路信息方式对扩频序列进行动态加密, 增加截获、破译难度的短码同步方案, 加密后的长码采用混沌扩频码扩频, 获得较高的安全性; 同时在接收单元采用一种改进的RAKE技术提高信号接收性能. 为了验证算法的有效性, 在卫星终端原理样机上进行了性能测试验证. 信息速率为 1.2 kbps、码片速率为 3.069 Mcps. 在 SNR 小于 -15 dB 条件下, 采用本文提出的算法, 2 ms 内可实现对 DSSS 扩频信号的可靠捕获和信道同步.

关键词: 突发通信; 混沌扩频; 动态加密; RAKE 接收

基金项目: 国家自然科学基金(No.91438206)

中图分类号: TN927.23

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)04-0907-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220228

A Burst Transmission Synchronization Algorithm for Satellite Communication

CHEN Hao¹, QIAO Kai¹, TONG Ye-ping²

(1. Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China;

2. The 7th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Guangzhou, Guangdong 510000, China)

Abstract: It is of great value to apply burst spread spectrum technology in satellite mobile communication to realize the global random encounter access of terminals. In the condition such as extremely short burst communication time, random burst time and narrow channel bandwidth of satellite mobile communication, as well as the requirement of ensuring reliable access and transmitting more effective information, a short code synchronization scheme that uses private and random information to encrypt the spread spectrum sequence in action is proposed in this paper, increasing the difficulty of interception and decoding. The encrypted long code is spread by chaotic spread spectrum code to obtain high security. At the same time, an improved rake technology is adopted in the receiving unit to improve reception performance of signal. In order to verify the effectiveness of the algorithm, the performance test is carried out on the principle prototype of satellite terminal. The information rate is 1.2 kbps, and the chip rate is 3.069 Mcps. Under condition of SNR less than -15 dB, reliable acquisition and channel synchronization of DSSS spread spectrum signal can be realized in 2 ms.

Key words: burst transmission; chaotic spread spectrum; dynamic encryption; RAKE receiver

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.91438206)

1 引言

低截获低检测 (Low Probability of Detection/Intercept/Exploitation, LPD/LPI/LPE) 新型安全通信技术是当前通信研究的热点. 典型的突发式直扩接收机系统及其载波同步技术通常在地面网络中有较为成熟的应用^[1-5], 但在大时延、大时变的窄带卫星信道^[6-9]中应

用, 难以满足其随遇接入和快速捕获跟踪需求. 文献 [10, 11] 研究不同保密级别的数据分级调制实现大信号掩盖小信号, 并从功率和周期两个方面设计提高信号波形抵抗常规盲检测, 但未针对接收和快速同步提出有效方法. 文献 [12~15] 研究使用 m 序列作为伪随机序列构造的扩频系统, 提高安全传输、抗检测和抗截获能力; 为进一步消除信号特征, 设计了大量具有确定长

度的和良好自相关/互相关特性的伪随机序列用于扩频,同时还利用伪随机序列用于随机化过程中的通信参数控制.但是传统的伪随机序列普遍存在着本原多项式少和序列周期性短等缺陷,无法进行有效的参数控制^[16-20].本文针对突发时间短且多径条件下接收快速同步困难,研究采用具有初值敏感、有界并且分布广泛的混沌序列作为伪随机扩频和控制序列,针对卫星信道信息速率很低,无法采用足够长的参考信号的特点,提出如图1所示的一种在发射单元采用私有、随路信息方式对扩频序列进行动态加密,增加截获、破译难度的短码同步方案,加密后的长码采用混沌扩频码进行扩频,获得较高的安全性;同时针对混沌编码的接收难点,在接收单元采用一种改进的RAKE接收技术提高信号接收性能,实现更低信噪比(Signal-Noise Ratio, SNR)条件下获得快速捕获能力.RAKE接收技术是一种多径分集接收技术,其概念是1958年由Price和Green在《多径信道中的一种通信技术》中提出来的.由于这种接收机收集许多路径上的信号,其作用与农用多齿草耙(英文为“Rake”)的作用相似,故称为Rake接收机,该接收方法涉及几个相关器的使用,每个都可以形象地看作是花圃的耙爪(Finger)或叉(Tine).这种接收机不是减弱或削除多径信号,而是充分利用多径信号的能量.

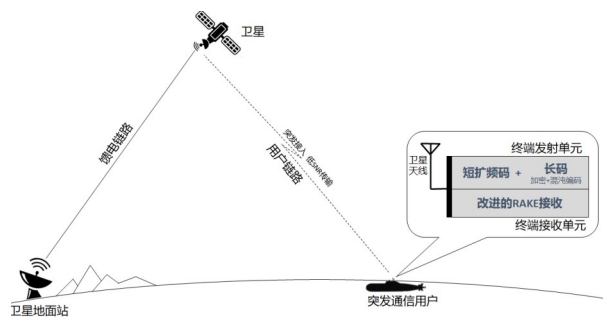


图1 通信突发传输系统模型图

2 发射单元设计

突发模式下,扩频码的暴露时间短,不需要采用超长伪随机序列以减少同步搜索时间.采用短码同步;采用私有、随路信息方式对扩频序列进行动态加密,增加截获、破译难度;采用低解调门限传输技术、功率控制技术增加安全性.发射单元原理框图如图2所示,其中纠错码可以采用Turbo(码率1/2),调制采用 $\pi/4$ -DQPSK.自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC)/参考信号字段可以尽量短,例如一个调制符号长度.

2.1 DSSS扩频方案

采用线性反馈移位寄存器LFSR产生短扩频码.长扩频码采用混沌序列.其中,短扩频码作用于AGC/参考信号,保证足够短搜索时间.

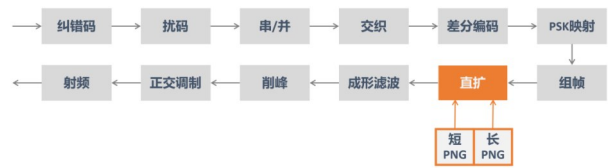


图2 发射单元原理框图

记I路、Q路的短码序列分别为 x_1, x_2 .定义一个复杂的非线性运算 $f(a, b)$ 和偏移量 M ,计算长扩频码作用于数据信号,I路、Q路的种子 y_1, y_2 为

$$y_1 = f(x_1, x_2) \quad (1)$$

$$y_2 = y_1 + M \bmod 2^{64} \quad (2)$$

因此,对于非合作方来说,长扩频码的周期足够长,而合作方在捕获短码以后可以迅速推算出长码序列,完成信号解扩处理.直接序列扩频(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)方案如图3所示.

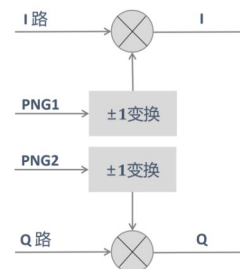


图3 DSSS扩频

2.2 迭代多项式选择方法

长码采用混沌编码,其中迭代多项式的选择是保证输出序列为混沌序列的关键问题所在,迭代多项式决定了输出序列的混沌性与周期长度.如何正确地选择迭代多项式是基于余数系统(Residue Number System, RNS)混沌序列产生所面临的核心问题所在.迭代多项式系数选择多项式的系数决定了多项式是否在有限域内为满射.一个满射的多项式的状态空间能够布满整个有限域,这样能保证序列周期的最大化.因此在选择多项式的时候,满射是一个核心条件.假如一个多项式非满射,会不可避免地造成迭代多项式模块产生数据时可能进入死锁状态,无法跳出,不能作为迭代多项式来使用.序列的产生是一个循环迭代的过程,每个多项式经过迭代取模后,产生一个数据,该数据既是下一级模块的数据源,也是本模块自身的数据源.所以选择的多项式在有限域 F_m 内应该拥有0到 $m-1$ 完整的一一映射,即当 x 取0到 $m-1$ 时,多项式的值应该遍历该有限域内的所有状态.

将这个迭代的过程看作为一个齐次马尔科夫链过程来分析所需要的多项式应该具备怎样的性质,以

$f_3(x) = \langle qx^3 + rx^2 + sx \rangle_3$ 为例,当系数 q, r, s 都为 1 时,其相应的状态转移图如图 4 所示.

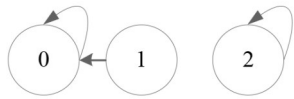


图 4 $q=s=r=1$ 时的状态转移图

其一步转移矩阵如下:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

可见当迭代多项式初始值 x 取 0 到 2 时,该多项式将只遍历了 0 和 2 两种状态,这样在不停地迭代过程中,状态 1 将会消失,为了表述方便,将此种状态定义为“消失态”.拥有消失态的多项式即不符合满射的性质,那么系统将最多进入一次消失态,也就是说在无限的迭代过程中,状态空间会变小.不仅如此,当状态到达 0 或者 2 时,整个系统将永远停留该状态,无法跳出,这种状态定义为“循环态”.假设一个多项式在其状态转移中存在循环态,那么生成的序列可能保持在同一个数据上,导致系统的非线性特性消失.为了避免上述两种情况的出现,在挑选多项式时需同时保证无“消失态”和“循环态”.如果所选择多项式为置换多项式时,置换多项式本身具备的一一映射性质,保证了置换多项式是一个无“消失态”存在的多项式.当多项式保证无消失态后,由于常数项的存在只是对状态转移的一个偏移,因此其也不会存在消失态.在无消失态的条件下,常数 c 的选择标准在于,希望状态空间仅有一个环存在,从而其周期最长.这样产生的状态转移图中也将不含有循环态,因为循环态本身就是一个环.

基于以上分析,我们在选择迭代多项式时应同时满足无“消失态”和“循环态”,在本文中结合置换多项式的生成方法,研究选择其系数的方法和实现算法.

2.3 长周期扩展方法优化方法

前述的多项式选择方法保证了图 4 所示的生成方法每个小的有限域计算是最长周期,本文基于中国剩余定理 (Chinese Remainder Theorem, CRT) 将这些小周期数环映射至一个极大周期的数环上.实现序列映射的模块为 CRT 变换模块,该模块框架如图 5 所示.

在图 5 中,数据源为 n 路迭代多项式生成的序列,经过该模块后整合成为一路序列,这是通过 CRT 来实现的,计算方式如下:

$$X = \left\langle \sum_{i=1}^L M_i \langle M_i^{-1} \rangle_{m_i} x_i \right\rangle_M \quad (4)$$

在 CRT 当中,主要问题是模 M 运算和乘法运算,当动态范围较大时,将降低 RNS 的并行特性,因此优化手段大多关注于如何减小或消除模 M 运算.对 CRT 进行

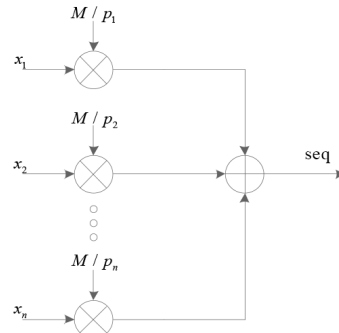


图 5 CRT 变换模块

适当变形,则可得到常用的改进形式.

CRT 的计算方法,保证了余数向量与传统权重系统的计算一一对应,以便使用位宽较小的模运算代替大位宽的运算.然而,在本文的伪随机序列生成方法中,将各迭代环路的迭代结果通过 CRT 来获得准确的在权重系统中的数值并不是必需的.这是由于系统本身需要的输出就是随机序列,只要保证其长周期特性不变,随机序列各时刻样点的准确数值是可以改变的.至于序列的随机性,无论是否通过 CRT 进行了准确的数值映射,都需要进行专门测试.基于以上考虑,可以对 CRT 进行优化,以便在于保证长周期映射前提下减小运算量.

在完成上述基于 RNS 和置换多项式的混沌序列生成方法的优化设计,确定混沌序列生成结构以后,再根据无特征隐蔽通信系统参数的研究和设计结果,确定扩频混沌序列和控制序列的参数,产生符合系统要求的序列并进行验证.

为验证高倍扩频比下的互相关性能,对生成信号任意设置两个 100 ms 观察窗口,对信号互相关性能进行对比分析.信号互相关性的计算方法如图 6 所示.

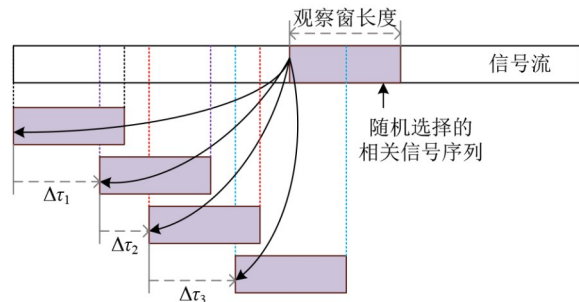


图 6 信号互相关性计算方式示意图

由图 6 可知,信号互相关性分析是利用随机选择的、长度为指定观察窗大小的信号序列与信号流进行随机滑动相关来完成的.

由于系统实现时每 2 个随机化符号变换一次载波,而信号相似度很大程度上取决于载波的持续时间,因此在设置观察窗口尺度时必须考虑载波持续期.

上述基于实际采样数据的相似度分析结果表明:

(1)在大量的随机相关情况下,信号互相关性的最大值均不超过1%;

(2)总体上,信号相似度随着观察窗口的增加而降低.对于高倍扩频无特征信号来说,观察时间越长,观察窗口内包含不同参数的信号采样点越多,具有相似特征的信号段的概率越低,信号的相似度值越小,对于安全性越有利.

3 接收单元设计

接收单元整体框图如图7所示,主要实现一个改进的RAKE接收,满足卫星信道混沌编码接收要求.

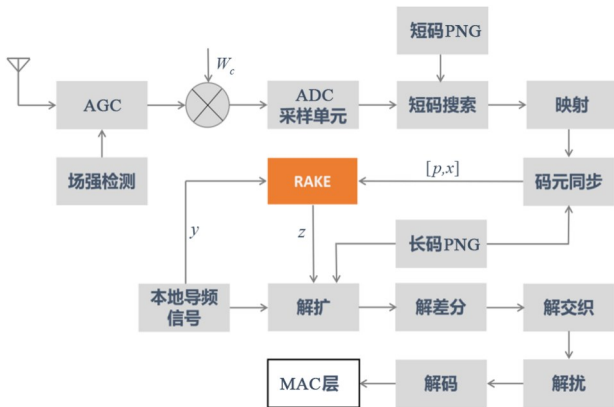


图7 接收单元原理框图

3.1 混沌接收的主要问题

混沌序列相对于m序列和M序列,不但具有高斯统计特征,而且具有长期不可预测性,能够承受复杂的破译攻击.采用混沌序列进行DSSS扩频时,其频谱具有更好的平衡特性,抗检测能力高,因此在隐蔽通信技术中有较高的应用前景.但是混沌序列的无规律性也使得相应的接收处理变得相当困难.问题之一为,扩频序列之间的正交性较差,导致解扩性能损失较大,不利因素包括解扩残余、RAKE分集精度低等.

RAKE接收机的基本结构如图8所示.首先利用相关器确定各路径的延迟、幅度、相位值,然后进行相应的延迟补偿,再解扩,按测出的幅度、相位值进行加权,最后将各路信号合并,完成RAKE处理.

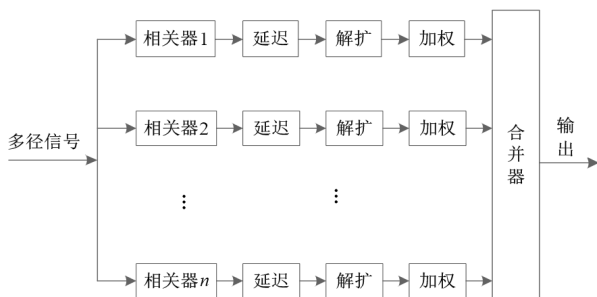


图8 RAKE接收机结构原理

接收的扩频信号可以表示为

$$r(k) = \sum_{l=1}^N a_l \cdot e^{j\theta_l} \cdot x(k-d_l) + n(k) \quad (5)$$

其中, $x(k)$ 是发射的基带扩频信号; a_l, θ_l, d_l 分别是路径 l 的幅度、相位与延迟.在RAKE接收处理中,经过本地的参考信号与 $r(k)$ 互相关运算,每条路径有一条对应的Sinc形曲线,其峰的位置、幅度、相位反映了 a_l, θ_l, d_l ,根据这些参数按照图8的方式进行处理可以获得SNR最大化的分级增益.

但在实际应用中,基于互相关运算的参数估计方法存在一些缺陷,主要包括:

- (1)Sinc曲线有较宽的主瓣导致时延分辨率不高,很难识别出时延相近的路径;
- (2)当 d_l 不是整数倍采样周期时,Sinc曲线存在较大的畸变,导致很难测准 a_l, θ_l, d_l ;
- (3)互相关曲线中存在较高的旁瓣,易于较弱多径所对应的曲线混淆,造成错误的合并.

这些原因使得互相关曲线不能准确反映信道冲激响应的形状,两者之间存在比较明显的差异,使用图9所示的衰落信道进行性能分析,其中莱斯因子为-3 dB(图9和图10),此时的互相关曲线未能准确反映出信道冲激响应的特点,相应的RAKE处理增益低于预期值,接收的性能较低.

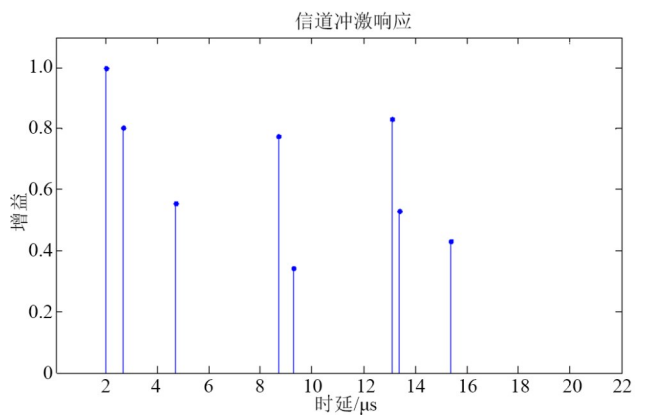


图9 信道的冲激响应

3.2 改进RAKE接收算法原理

为了改善接收信号的灵敏度,本文提出一种提高高分集合并增益的方案(图11).在数据解析单元中利用参考信号p对多径传播效应用横向滤波器模型进行建模,求解滤波器系数C,而在信号重构模块中利用同样的模型对业务信号进行分集合并,提高信号接收灵敏度.其中信号解析单元结构如图12所示,p是接收信号中的参考信号,y是本地的参考信号.

在信号解析模块中构造一个FIR横向滤波器,该滤波器利用本地导频参考信号p和滤波器多项式系数

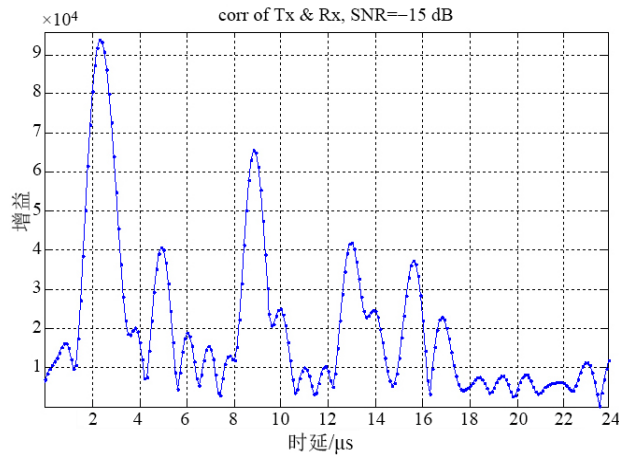


图 10 互相关曲线

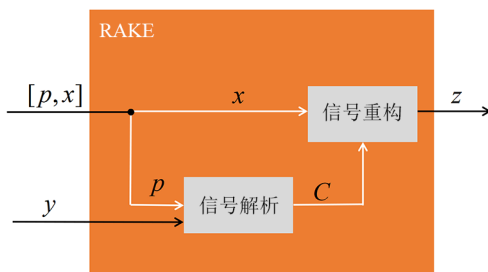


图 11 改进的 RAKE 接收机

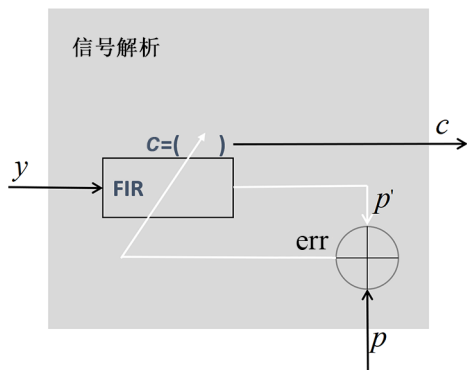


图 12 信号解析模块

$C(C=[C_0, C_1, C_2, \dots, C_{L-1}])$ 逼近接收信号中的参考信号 p 而生成一个 p' . 通过算法调整 $C_0, C_1, C_2, \dots, C_{L-1}$ 等滤波器系数,使得 err 尽量小. FIR 滤波器结构如图 13 所示.

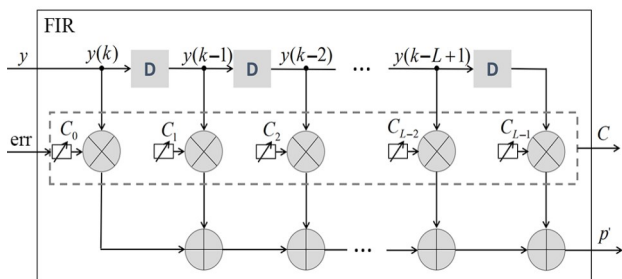


图 13 FIR 滤波器结构

利用 $y(k)$ 来构造 $p(k)$ 中的有效成分,取抽头数为 L ,有

$$\begin{pmatrix} p(k) \\ p(k+1) \\ \vdots \\ p(k+n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y(k) & y(k-1) & \dots & y(k-L+1) \\ y(k+1) & y(k) & \dots & y(k-L+2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(k+n) & y(k+n-1) & \dots & y(k-L+n+1) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \vdots \\ C_{L-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} err(k) \\ err(k+1) \\ \vdots \\ err(k+n) \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中, $err(k)$ 是 $p(k)$ 中不能被建模的部分.

按最小二乘准则方法求解系数 $C(k), k=0, 1, 2, \dots, L-1$. 如果 L 大于信道的时延扩展范围,根据正交原理,式(6)右边第一项将包含 $p(k)$ 中的全部有效成分, $err(k)$ 为噪声等无效成分.

根据解得的系数 C 以及 FIR 的结构,可以看出,信号的传输过程,即由发射机输出的 $y(k)$ 经过多径信道,在接收机中形成 $x(k)$ 的效果,可以等效以下操作,先将 $y(k)$ 经过逐级的单位延迟分为 L 路,再将各路乘以相应的系数 $C(k), k=0, 1, 2, \dots, L-1$,最后叠加起来,得到近似的 $x(k)$. 也就是将多径信道等效为 L 个抽头的 FIR 滤波器.

因此,在对后续的业务信号 $x(k)$ 进行分集、合并时,可以基于上述模型对 $x(k)$ 做逆操作:分为 L 路进行时延补偿及幅度加权,最后叠加,完成 RAKE 处理. 其中,时延补偿的方法为,路径时延大的时延补偿小,路径时延小的时延补偿大,使得经过补偿以后,各条径的总时延相同.

对应的信号重构模块的原理如图 14 所示,经改进的 RAKE 处理后输出 $z(k), k=0, 1, 2, \dots, L-1$.

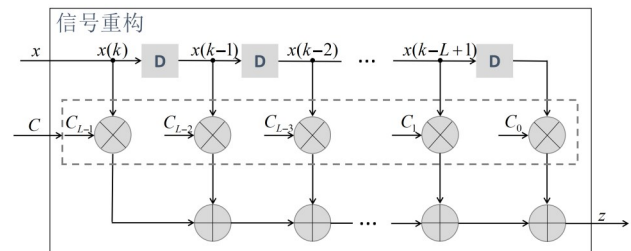


图 14 信号重构模块

4 实验分析

为验证性能,取 DSSS 扩频倍数为 100,采用图 9 的衰落信道, $SNR=-20$ dB,采用如图 8 所示的现有典型方法和本文提出的算法分别进行信号分集合并、解扩试验. 图 15 的解扩输出波形对比表明,本文方法与理想情况比较吻合,而原有的典型方法解扩后与基带未扩频参考信号有较大的偏离.

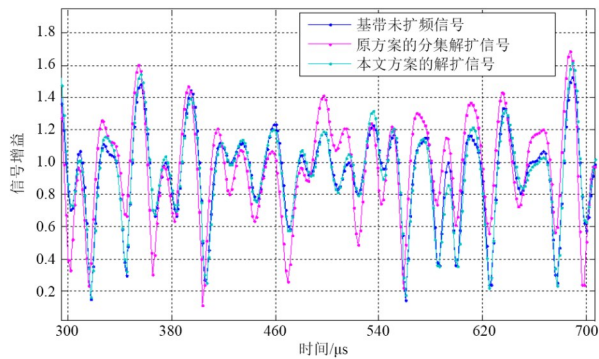


图 15 解扩信号

扩频信号的解调门限为 -26 dB. 在不同信噪比条件下的捕获概率曲线如图 16 所示.

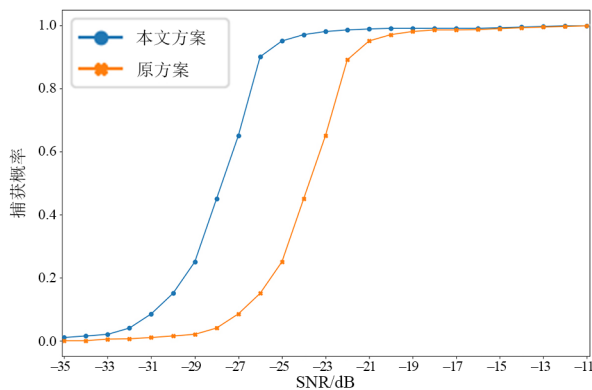


图 16 捕获概率曲线

解扩后的误码率曲线如图 17 为所示, 本文方案获得了大约 0.8 dB 的灵敏度提升.

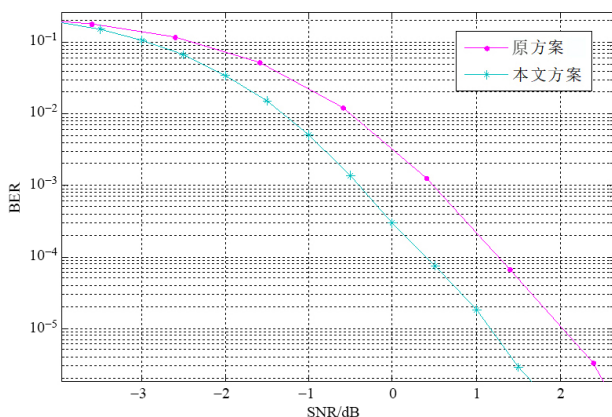


图 17 解码性能

在一款卫星终端原理样机上进行了性能测试验证, 信息速率为 1.2 kbps、码片速率为 3.069 Mcps, 在 SNR 小于 -15 dB 条件下, 2 ms 内可实现对 DSSS 扩频信号的可靠捕获和信道同步.

5 结论

本文在发射单元采用私有、随路信息方式对扩频序列进行动态加密, 增加截获、破译难度的短码同步方案, 加密后的长码采用混沌扩频码进行扩频, 获得较高的安全性. 在接收单元用互相关方法来识别多径信道的参数时, 由于其 Sinc 型曲线的主瓣宽度、旁瓣等的影响, 存在分辨率不高和错漏等问题, 在延迟和加权环节有一定偏差, 使合并效果低于预期值. 本文的信号建模、重构方法基于等效、逼近原理避免了这些问题, 改善了通信安全能力.

参考文献

- [1] 冯久超, 余英林, 周曙. 基于混沌的扩频通信[J]. 通信学报, 1998, 19(6): 76-83.
FENG J C, YU Y L, ZHOU S. Chaos-based spread spectrum communication[J]. Journal of China Institute of Communications, 1998, 19(6): 76-83. (in Chinese)
- [2] ALI I, AL-DHAHIR N, HERSHEY J E. Doppler characterization for LEO satellites[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(3): 309-313.
- [3] 孙锦华, 王雪梅, 吴小钧. 短突发系统数据辅助载波同步的导频设计[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(3): 669-675.
SUN J H, WANG X M, WU X J. Pilot design of data-aided carrier synchronization for short burst transmission[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(3): 669-675. (in Chinese)
- [4] 王伶, 刘芳, 焦李成. 一种空时盲自适应 RAKE 接收机[J]. 电子学报, 2002, 30(12): 1779-1782.
WANG L, LIU F, JIAO L C. A space-time blind adaptive RAKE receiver[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(12): 1779-1782. (in Chinese)
- [5] 孙晓文, 张淑芳, 胡青, 等. 一种基于改进的 Rake 模型的 GNSS 接收机抗多径新技术[J]. 电子学报, 2011, 39(10): 2422-2426.
SUN X W, ZHANG S F, HU Q, et al. A new anti-multipath technique based on modified rake model for GNSS receiver[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(10): 2422-2426. (in Chinese)
- [6] 杨杨, 江彬, 高西奇. GEO 双极化多波束卫星移动通信系统信道建模[J]. 高技术通讯, 2015, 25(S1): 775-782.
YANG Y, JIANG B, GAO X Q. Channel modeling of dual-polarized multi-beams GEO mobile satellite communication systems[J]. Chinese High Technology Letters, 2015, 25(S1): 775-782. (in Chinese)
- [7] 张建飞, 丁广, 杨建东, 等. 海上云层和降水对船载高频段卫星通信的影响[J]. 电子学报, 2018, 46(2): 381-386.
ZHANG J F, DING G, YANG J D, et al. Influence of

- ocean clouds and precipitation to shipborne high frequency band satellite communication[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(2): 381-386. (in Chinese)
- [8] 姚立红, 訾小超, 李建华. 隐蔽通道的信息传递模型[J]. 电子学报, 2008, 36(11): 2216-2219.
YAO L H, ZI X C, LI J H. An information transmission model for covert channel[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(11): 2216-2219. (in Chinese)
- [9] 韦亮, 宋高俊, 田亮. 基于部分信道信息的卫星移动链路 ACM方法[J]. 电子学报, 2018, 46(9): 2063-2067.
WEI L, SONG G J, TIAN L. An ACM method based on partial channel information for mobile satellite link[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(9): 2063-2067. (in Chinese)
- [10] 雷维嘉, 周洋. MIMO全双工双向通信系统平均保密和速率的优化[J]. 电子学报, 2020, 48(6): 1041-1051.
LEI W J, ZHOU Y. The optimization of average secrecy sum rate for MIMO full duplex two-way communication systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(6): 1041-1051. (in Chinese)
- [11] 谢岸宏, 朱立东, 翟继强, 等. 一种抗盲检测的直扩隐蔽信号设计方法[J]. 电子学报, 2018, 46(12): 2817-2823.
XIE A H, ZHU L D, ZHAI J Q, et al. A method of designing covert DSSS-signal for anti-blind detection[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(12): 2817-2823. (in Chinese)
- [12] 曾凌川, 白燕, 卢晓春, 等. 一种基于调制 m 序列的直接序列扩频信号调制方法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(8): 2156-2164.
ZENG L C, BAI Y, LU X C, et al. A signal modulation method of direct sequence spread spectrum based on modulated m-sequence[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(8): 2156-2164. (in Chinese)
- [13] 张刚, 和华杰, 张鹏. 降噪改进型多载波 CDSK 混沌通信系统[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(5): 1389-1397.
ZHANG G, HE H J, ZHANG P. Noise reduction improved multi-carrier CDSK chaotic communication system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(5): 1389-1397. (in Chinese)
- [14] 韩芳, 郭文明, 陈晓飞. 基于 MRLS 的低轨卫星移动通信随机接入前导检测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11): 61-64, 83.
HAN F, GUO W M, CHEN X F. Design of random access preamble detection system for LEO satellite mobile communication based on MRLS[J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(11): 61-64, 83. (in Chinese)
- [15] 刘秋红, 许漫坤, 李天昀. 基于 ML 的多径信道下直扩信号 PN 码和信道的联合盲估计[J]. 电子学报, 2021, 49(8): 1480-1488.
LIU Q H, XU M K, LI T Y. Joint blind estimation of PN codes and channels with maximum likelihood for DSSS signals in multipath channels[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(8): 1480-1488. (in Chinese)
- [16] 李振东, 谭维凤, 康成斌, 等. 直接序列扩频系统抗干扰能力研究[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(1): 116-123.
LI Z D, TAN W F, KANG C B, et al. Research on anti-interference ability of direct sequence spread spectrum system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(1): 116-123. (in Chinese)
- [17] 张丹娜, 钱锋, 冯辉, 等. Walsh 码软扩频信号降噪算法[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(4): 773-780.
ZHANG D N, QIAN F, FENG H, et al. Noise reduction algorithm of Walsh code soft spread spectrum signal[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(4): 773-780. (in Chinese)
- [18] SHENG Z C, TUAN H D, DUONG T Q, et al. Beamforming optimization for physical layer security in MISO wireless networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(14): 3710-3723.
- [19] TUYEN LE A, TRAN L C, HUANG X J. Cyclostationary analysis of analog least mean square loop for self-interference cancellation in In-band full-duplex systems[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(12): 2738-2741.
- [20] 吴宇飞, 刘琰, 高军军. 高动态猝发扩频信号低复杂度快速捕获技术[J]. 计算机仿真, 2021, 38(10): 43-47, 63.
WU Y F, LIU Y, GAO J J. High dynamic burst spread spectrum signal low complexity rapid acquisition technology[J]. Computer Simulation, 2021, 38(10): 43-47, 63. (in Chinese)

作者简介



陈 昊 男, 1982年7月出生, 安徽人. 博士, 副研究员, 发表学术论文 50 余篇. 主要研究方向为信号与信息处理. 中国电子学会会员编号: E190031303M.

E-mail: ritian99@21cn.com



乔 凯 男, 1981年11月出生, 山西人. 2005年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 现为北京跟踪与通信技术研究所助理研究员. 主要研究方向为光学遥感卫星论证、设计等.

E-mail: qk_lucky@sohu.com