

文章编号: 1001-3806(2016)02-0264-06

一种基于星间光链路的帧同步与频偏估计方法

邓博于, 赵尚弘*, 李勇军, 程 振, 张曦文

(空军工程大学 信息与导航学院, 西安 710077)

摘要: 为了解决星间激光通信不同步导致的信息质量差与解调难度大等问题, 针对滑动互相关算法帧同步易受载波频偏影响的不足, 采用计算仿真的方法分析了星间多普勒效应引起的载波频偏程度, 提出差分相关算法以实现帧同步与载波频偏估计, 并给出硬件实现方案, 分析了差分相关算法的帧同步与载波频偏估计性能。结果表明, 差分相关算法能够实现大载波频偏影响下的帧同步, 且具有较强的频偏估计性能, 采用差分相关算法后系统的误码性能提升近 3dB。此结果说明, 差分相关算法是解决星间激光链路同步问题的有效方法。

关键词: 光通信; 帧同步; 差分相关算法; 载波频偏估计; 多普勒效应

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.02.024

A approach of frame synchronization and frequency offset estimation based on optical satellite link

DENG Boyu, ZHAO Shanghong, LI Yongjun, CHEN Zhen, ZHANG Xiwen

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The unsynchronization of optical satellite communication leads to error information and demodulation difficulty. And carrier frequency offset has effect on frame synchronization of sliding correlation algorithm. To solve the problem, frequency offset caused by satellite Doppler effects was analyzed by calculation simulation and difference relation algorithm was proposed for the realization of frame synchronization and frequency offset estimation. Implementation scheme of hardware was given. The performance of difference relation algorithm was analyzed. The results show that difference relation algorithm implements frame synchronization under the influence of high carrier frequency offset and has strong ability of frequency offset estimation. After using difference correlation algorithm, the error bit performance of the system increases nearly 3dB. It is useful to use difference relation algorithm to solve the synchronization problem of laser satellite link.

Key words: optical communication; frame synchronization; difference correlation algorithm; carrier frequency offset estimation; Doppler effect

引 言

随着空间发展应用与研究的逐渐深入, 大数据量、高速率可靠传输的需求导致微波链路通信系统显露出不足^[1]。相比之下, 以激光为信息载体的光通信系统具有信号频谱范围大、通信终端小、功耗低、信道容量大等多项优点, 以激光链路代替微波链路成为卫星通信发展的必然趋势^[2-3]。在星间激光通信中, 受复杂空间环境影响, 接收端恢复信息难度大, 同步技术可有效改善卫星调制解调性能, 保证数据链路传输控制协议正确执行, 其工作质量直接决定星间通信质量, 因此,

基于星间激光链路的帧同步与频率同步成为亟待解决的问题。

卫星通信中常用的帧同步方法包括附加同步标记 (attached synchronization marker, ASM) 与基于相关序列两种方式。基于附加同步标记的帧同步以 ASM 作为传输帧开始标识, 接收端通过检测接收比特序列中的 ASM 实现帧同步。参考文献[4]~参考文献[6]中对高级在轨系统 (advanced orbiting system, AOS) 自适应帧长序列采用 ASM 方法, 在不影响吞吐量的条件下实现帧同步, 但是其性能受帧长影响较大。参考文献[7]中提出一种综合帧同步方案, 延长了帧同步时间, 提高了自适应帧长性能, 但是帧误比特率严重影响帧同步性能。相比之下, 基于相关序列的帧同步对误比特率的容忍门限较宽, 帧同步性能更优。参考文献[8]~参考文献[9]中提出基于接收序列的自相关帧同步法, 其对载波频率偏移 (简称频偏) 有较强的抵抗

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (2012M512066)

作者简介: 邓博于 (1991-), 男, 硕士研究生, 从事卫星光网络方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: zhaoshangh@aliyun.com

收稿日期: 2014-12-22; 收到修改稿日期: 2015-01-26

能力,但是在信噪比较小的条件下,帧同步难度较大。参考文献[10]中采用克服频偏的互相关帧同步算法,针对互相关易受载波频偏影响的问题进行改进,帧同步性能良好,但是硬件复杂度增加,并且不能同时实现载波频偏估计。星间通信必须在保证帧同步的同时进行载波频偏的补偿,保证接收端解调性能,才能提高通信质量。常用的频偏估计方法包括 Kay 算法、L&R 算法、M&M 算法和 Rife 算法等,分别存在高信噪比限制、频偏载波估计范围较窄、硬件实现难度较大、小频偏敏感性差精度不高等问题^[11-14],且没有基于帧格式设计与帧同步的载波频偏估计方法。

在星间激光通信中,一方面,由于星间的长传输延时和复杂信道特性,导致收发端的信号时刻存在偏差,对链路性能影响非常大;另一方面,多普勒频移和收发端晶振频差引起频率偏移,导致链路性能恶化。因此星间激光通信的帧同步实现难度较大,不仅要保证低信噪比条件下同步误差尽量小,而且要考虑多普勒效应对同步性能的影响。本文中基于卫星光网络帧结构,提出了差分相关算法用以实现帧同步与载波频偏估计,有效克服星间传输的不利影响。

1 基于滑动相关的帧同步方法

未来空间传输业务趋于复杂化,须设计一种卫星光网络路由转发与链路传输的可行帧结构进行数据管理,从而减少链路开销,提高服务质量。图1中给出了卫星光网络帧结构设计。

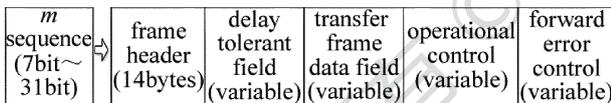


Fig. 1 Frame structure of optical satellite network

帧传输至接收端进行数据处理时,首先要保证帧定位与同步。 m 序列具有良好的自相关性,通过在帧头处添加 m 序列,可依据其自相关性在接收端精确获取同步位置。提取帧结构中的 m 序列作为发送端帧同步序列 $\{c_n\}$,同步序列满足以下条件:

$$R = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} c_{n+l} c_l^* = \begin{cases} 1, (n = 0) \\ -\frac{1}{L}, (n \neq 0) \end{cases} \quad (1)$$

式中, R 为同步序列相关值, L 为同步序列长度, n 为循环移位长度,*代表共轭。

滑动互相关算法实现步骤如下:接收端从数据帧中提取接收序列与已知本地序列滑动对准与相关计算,当接收序列滑动到与本地序列对齐时,得到一个非常尖锐的相关峰,说明序列实现了帧同步。提取接收端的信号序列为 $\{r_k\}$,并与本地序列 $\{c_n\}$ 进行滑动互相关运算:

$$R_{SCC}(k) = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} r_{n+k} c_n^* \quad (2)$$

由于同步序列良好的伪随机性,即使在高斯噪声干扰严重的情况下,仍能准确定位。基于滑动互相关的帧同步在运算过程中开销较少,传输效率高,理论上对空间高速数据传输有较强适用性,可解决通信收发端帧同步问题。但滑动互相关算法较易受载波频偏干扰的影响。若存在归一化载波频偏为 f_c 时,设接收信号为:

$$r_n = c_n e^{j2\pi n f_c} \quad (3)$$

将(3)式带入(2)式可得滑动互相关值:

$$R_{SCC}(k) = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} [c_n e^{j(2\pi n f_c + \varphi_c)}] c_n^* =$$

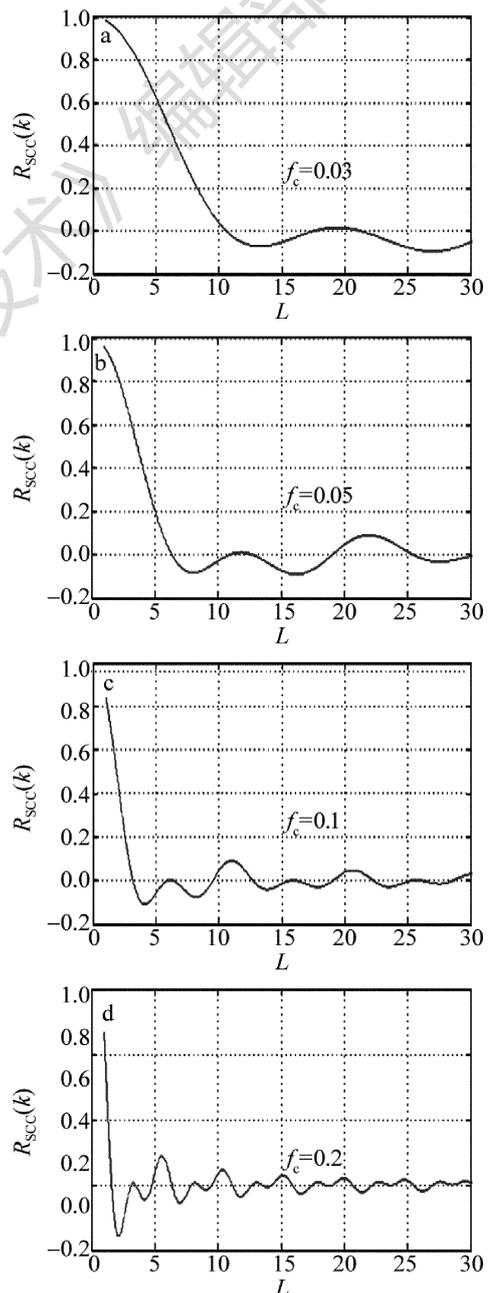


Fig. 2 Curve of sliding correlation value

$$\frac{1}{L} e^{j\varphi_c} \sum_{l=0}^{L-1} |c_n| e^{j2\pi n f_c} = e^{j[\pi(L-1)f_c + \varphi_c]} \text{sinc}(\pi L f_c) \quad (4)$$

当相位 $\varphi_c = 0$ 、频偏 f_c 分别为 0.03, 0.05, 0.1 和 0.2 时, 相关值 R_{SCC} 与 L 关系如图 2 所示。

可知随着同步序列的增大, 相关值趋于减小, 在保证同步序列在接收端易于识别的同时, 要使同步序列尽可能短。随着频偏 f_c 的增大, 同步性能逐渐变差, 较难获得相关峰值点。图 3 为 $L = 7$ 时滑动互相关值 R_{SCC} 随频偏 f_c 的变化曲线。

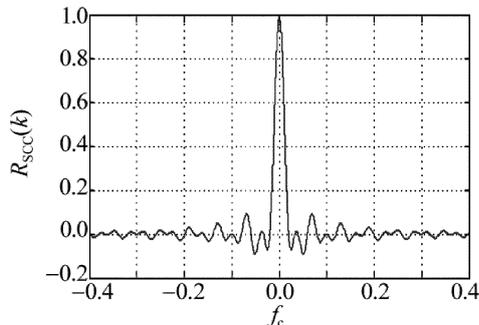


Fig. 3 Relationship between R_{SCC} and f_c

如图 3 可知, 当 $f_c = 0$ 时相关峰值达到最大, 且会随载波频偏呈现出 sinc 函数衰减, 当载波频率达到一定值时, 相关峰值甚至会趋于 0, 较大的载波频偏增大了帧同步的难度。由上述分析可知, 滑动互相关算法对存在频偏的通信系统适用性较差, m 序列的长度对于通信质量影响较大。

2 帧同步与载波频偏估计方法

2.1 多普勒频移对帧同步的影响

实际上, 在星间激光通信与卫星光网络中, 卫星接收、发端晶振存在固定的载波频偏, 同时, 卫星平台的相对高速运动引起激光波长的变化导致多普勒频移, 且对同步性能与通信质量影响更为严重^[15]。多普勒频偏公式如下:

$$\Delta f = \left(\frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta \cos \theta} - 1 \right) f \quad (5)$$

式中, $\beta = v/c$, c 为光速, v 为卫星收发平台相对速率; θ 为光波传输方向与卫星相对运动方向的夹角; f 为激光的主频。以低轨卫星与同步轨道卫星的激光通信为例, 同步轨道卫星高度为 35700km, 周期为 24h; 低轨卫星高度设为 500km, 周期为 3h, 波长为 1064nm。两颗卫星距离最近时取时间 $t = 0$, 采用 STK 软件仿真可获得卫星轨道时间对应坐标, 引用惯性公式, 得到两颗卫星的多普勒频偏变化曲线, 如图 4 所示。

两颗卫星多普勒频偏最大可达 $\pm 7\text{GHz}$, 会导致严重的载波偏移与信号幅度衰减, 对接收端解调有较大

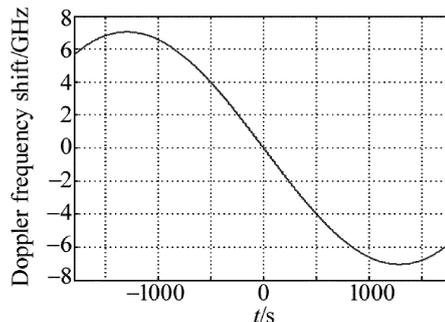


Fig. 4 Curve of Doppler frequency offset

影响, 给同步带来极大的难度。多普勒频移是影响载波频偏的重要因素, 不同轨道的卫星之间进行通信时多普勒频移量并非定值, 对基于滑动互相关的帧同步产生的干扰极为严重, 无法准确获得帧的定时位置, 且在卫星光通信中, 很难通过锁相环对多普勒频移进行跟踪。星间激光通信传输速率可达 5Gbit/s, 通过计算可得上述两颗卫星所引起的归一化载波频偏 $f_c T$ 范围为 $(-0.163, 0.163]$ 。

2.2 差分相关算法

由于空间激光通信存在较大多普勒频偏, 导致接收信号频谱偏移与衰减, 如果将接收序列与本地同步序列进行互相关运算, 很有可能无法得到峰值点。因此, 为消除多普勒频移导致的载波频偏影响, 利用 m 序列的自相关性质, 引入差分互相关 (difference correlation, DC) 算法抑制频偏的影响, 实现帧同步与载波频偏估计。

卫星激光通信采用高斯白噪声信道, 本地序列采用 m 序列, 因此可以获得接收序列信号如下:

$$r(n) = c(n-l) e^{j(2\pi n f_c T + \varphi_c)} + w(n) \quad (6)$$

式中, $c(n)$ 为 m 序列; l 为经过信道传输后本地序列的时延; f_c 为卫星激光通信中产生的频偏, 以多普勒频偏为主, 每帧传输消耗时间非常少, 其多普勒频偏可视为定值; T 为符号周期; φ_c 为信号的相移; $w(n)$ 为加性高斯白噪声。差分相关算法先将接收序列进行差分运算, 可得:

$$z_{n,d} = r_n r_{n-d}^* = c(n-l) c(n-d-l)^* e^{j2\pi d f_c T} + w_1(n) \quad (7)$$

式中, d 为共轭差分间隔, 取值范围为 $[1, L-1]$; 下标 d 表示将序列进行差分运算, 即序列与自身移位 d 位后共轭相乘; $w_1(n) = c(n-l-d)^* w(n) e^{-j2\pi(n-d)f_c} + c(n-l) w(n-d) e^{j2\pi n f_c} + w(n) w(n-d)$ 为噪声项。经过差分运算, 载波频偏带来的相位旋转变成了固定的载波相位。本地差分序列的构建, 使经过差分运算的接收序列得到匹配, 获得相关峰值点。差分后的接收序列和本地差分序列进行互相关, 可得到:

$$R_{DC}(k) = \sum_{n=0}^{L-1} z_{n+k,d} [c_{n,d}]^* = \sum_{n=0}^{L-1} |c(n)|^2 |c(n-d)|^2 e^{j2\pi d f_c T} + w_2(n) = Le^{j2\pi d f_c T} + w_2(n) \quad (9)$$

$$\sum_n^{L-1} c(n-l+k)c(n-d-l+k)^* \times e^{j2\pi d f_c T} [c(n)^* c(n-d)] = \sum_n^{L-1} [c(n-l+k)c(n)^*] \times [c(n-d-l+k)c(n-d)^*]^* e^{j2\pi d f_c T} \quad (8)$$

由 m 序列的相关性可知, 仅当 $k=l$ 时, 差分相关值才会出现峰值点, 且最大值为 $R_{DC}(l)$ 。即:

$$R_{DC,max}(k) = R_{DC}(l) =$$

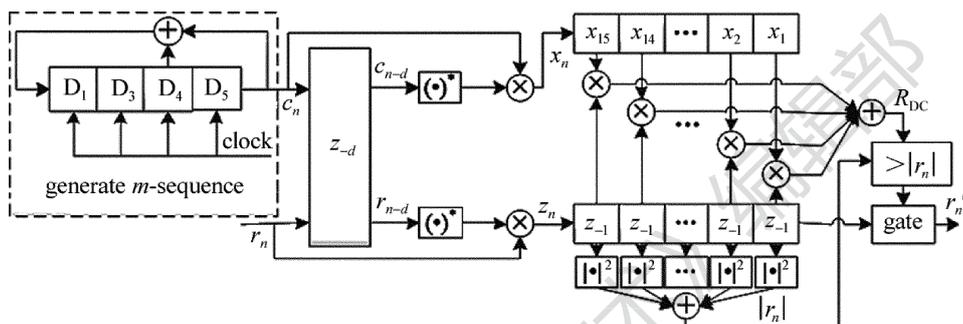


Fig. 5 Implementation of difference relation algorithm

差分相关算法中本地序列与接收序列分别进行了差分运算, 即延迟 d 个单位并进行共轭相乘。当接收序列与本地序列对齐时, 得到较大的差分相关峰值 R_{DC} 。将接收序列的模值作为判决值以控制门开关, 当 $R_{DC} > |r_n|$ 时, 输出经过帧同步处理后的接收序列 $\{r_n'\}$ 。差分相关算法可消除载波频偏对帧定位的影响, 有效实现帧同步。

根据差分相关峰值 $R_{DC}(l)$ 与共轭差分间隔 d , 得到载波频率偏移估计如下:

$$\hat{f}_c = \frac{\arg \max \{R_{DC}(k)\}}{2\pi d T} = \frac{\arg \{R_{DC}(l)\}}{2\pi d T} \quad (10)$$

式中, $\arg \{ \cdot \}$ 表示相关值的载波相位, 限定取值范围为 $(-\pi, \pi]$, 因此载波频偏估计范围为:

$$-\frac{1}{2dT} < \hat{f}_c \leq \frac{1}{2dT} \quad (11)$$

载波频偏估计范围与精度由共轭差分间隔 d 决定, 剩余频差较大时控制 d 取值减小, 扩大估计范围, 剩余频差较小时令 d 增大, 提高估计精度。也就是说, 可以通过控制 d 值大小, 灵活控制估计精度与估计范围, 若 $d=1$ 时, 可以得到最大估计范围 $(-0.5T, 0.5T]$ 。

3 仿真与分析

通过 MATLAB 仿真平台对帧同步与载波频偏估计进行仿真。参量设置如下: 同步序列长度 $L=31$, 帧

长 $N=128$, 长度均以 byte 为单位, 调制方式采用二进制相移键控 (binary phase shift keying, BPSK) 调制。在卫星激光通信中, 由于长传输时延与复杂信道环境影响, 帧的位置会发生偏移。模拟帧传输过程, 在传输的数据流中随机产生帧时延, 通过差分相关算法搜索相关峰值点, 实现帧同步。选取差分共轭间隔 $d=10$, 得到频偏 f_c 为 0, 0.0065 和 0.163 时帧同步位置与差分相关能量关系曲线, 如图 6 所示。

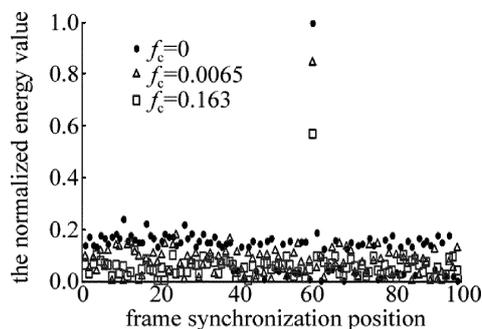


Fig. 6 Normalized relationship between energy value and frame synchronization position

由图 6 可知, 帧同步位置为 60, 在载波频偏为 0 时相关能量值达到最大。随着载波频偏的增大, 相关峰值逐渐减小。图 7 为频偏为 0.163 时差分相关帧同步能量归一化变化图, 其帧同步位置为 53, 可知经过能量归一化, 所有点的能量相关值均产生增长, 能量峰值点依然较为突出, 说明即使有较大频偏, 并不会影响帧定位。通过本文中的算法, 在接收数据流中可实现

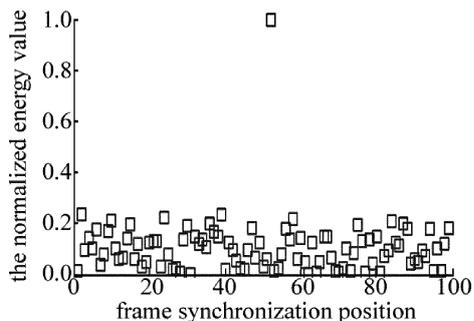


Fig. 7 Normalized energy value with high frequency offset

帧起始位置的判定与同步。

克拉美罗限 (Cramer-Rao lower bound, CRB) 为频偏估计下限,用以衡量频偏估计性能,其理论值为:

$$CRB(f_c) = \frac{6}{(2\pi)^2 N(N^2 - 1) R_{SNR}} \quad (12)$$

为检验本文中的算法在实际卫星激光通信中频偏估计性能,在载波频偏为 0.0065 与 0.163 时,分别对本文中算法、Kay 算法、M&M 算法与 L&R 算法在信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) R_{SNR} 为 $[-10, 15]$ 的每个信噪比点的频偏估计值进行 500 次计算,求均方误差 (mean square error, MSE),如图 8 和图 9 所示。

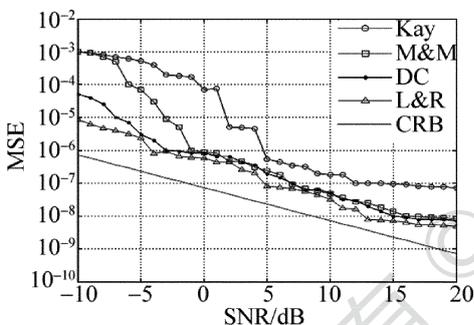


Fig. 8 Relationship between MSE and SNR with low frequency offset

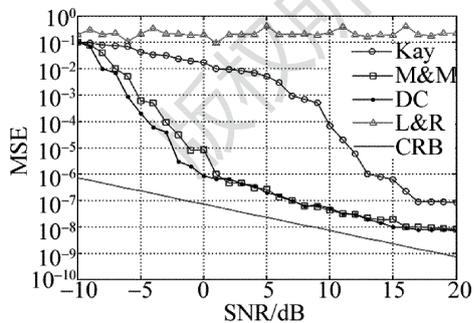


Fig. 9 Relationship between MSE and SNR with high frequency offset

由图可知,DC 算法的归一化频偏估计均方误差接近于克拉美罗限,具有较强频偏估计性能。相比于 Kay 算法,DC 算法无论频偏大小均有较高的估计精度与较小的信噪比门限。在较大载波频偏影响下,DC 算法的估计精度远远高于 Kay 算法,且信噪比门限比 Kay 算法低 19dB。DC 算法与 M&M 算法估计精度性能相近,但是 DC 算法的信噪比门限低于 M&M 算法。

L&R 算法在小频偏影响下其估计精度最接近克拉美罗限,且没有信噪比门限,其估计性能优于 DC 算法。但是 L&R 算法性能受大频偏影响严重,估计性能极差,而 DC 算法受频偏影响较小,其性能优于 L&R 算法,对于卫星通信具有较强适用性。

图 10 为采用 DC 算法前后误比特率随性噪比变化关系曲线,可知随着信噪比的增大,误比特率逐渐减小,相比之下,采用差分相关算法其性能明显优于未采用算法的情况。当信噪比为 11dB 时,采用差分相关算法的误比特率减小到 4×10^{-6} ,未采用算法的误比特率为 2×10^{-4} 。误比特率为 10^{-5} 时,采用 DC 算法在信噪比为 9.7dB 即可达到,未采用算法的信噪比需要达到 12.8dB,相差近 3dB。说明采用差分相关算法可有效提高星间光链路通信性能。

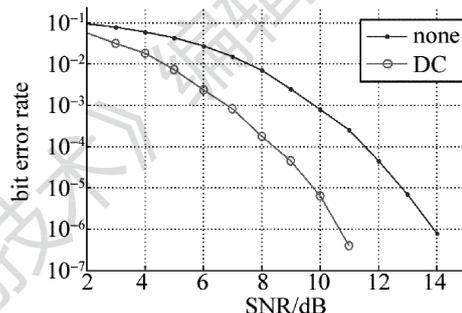


Fig. 10 Relationship between bit error rate and SNR

综上所述,差分相关算法不仅可以克服较大频偏影响实现星间激光通信帧同步,还可以进行载波频偏估计,性能良好,适用于星间激光通信系统与光网络传输。

4 结论

同步技术可有效改善复杂信道、长传输时延以及多普勒效应对星间激光通信质量造成的影响。针对滑动互相关受载波频偏影响较大的问题,提出差分相关算法以实现星间激光通信帧同步与载波频偏估计,是解决星间光通信时频同步的有效方法。但是差分相关算法的硬件实现具有一定复杂度,下一步将针对相关问题进行深入研究。

参 考 文 献

- [1] ZHAO J, ZHAO Sh H, LI Y J, et al. Advance on data relay technology for inter-satellite laser links[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(11):3103-3110(in Chinese).
- [2] ZHAO Sh H, WU J L, LI Y J. Present status and developing trends of satellite laser communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(9): 25-39(in Chinese).
- [3] LI M, AI Y, CAO Y. Research of fine tracking servo system for FSO terminal[J]. Laser Technology, 2009, 33(3): 262-265(in Chinese).
- [4] CONSULTATIVE COMMITTEE FOR SPACE DATA SYSTEMS. 131.

- 0-B-2 TM synchronization and channel coding, recommendation for space data system standards [S]. Washington DC, USA: Consultative Committee for Space Data System, 2011: 11-40.
- [5] CONSULTATIVE COMMITTEE FOR SPACE DATA SYSTEM. 231. 0-B-2 TC Synchronization and channel coding, recommendation for space data system standards [S]. Washington DC, USA: Consultative Committee for Space Data System, 2010: 15-36.
- [6] CONSULTATIVE COMMITTEE FOR SPACE DATA SYSTEM. 211. 0-B-5 proximity-1 space link protocol-data link layer, recommendation for space data system standards [S]. Washington DC, USA: Consultative Committee for Space Data System, 2013: 21-49.
- [7] BI M X, PAN Ch Sh, TIAN Y. Simulation and research of frame synchronization scheme for adaptive frame length AOS[J]. Information and Control, 2012, 41(4):446-453 (in Chinese).
- [8] TANG S, PENG K, GONG K, *et al.* Robust frame synchronization for chinese DTTB system [J]. IEEE Xplore, 2008, 54(1): 152-158.
- [9] YUAN J G, LI H, LIANG T Y, *et al.* A new algorithm on the frame synchronization error estimation for optical OFDM system[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2012, 23(12): 2327-2332 (in Chinese).
- [10] YANG Ch, WU Y L, JIN Y. A novel approach of frame synchronization in presence of frequency offset[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2013, 36(3): 353-358 (in Chinese).
- [11] KAY S. A fast and accurate single frequency estimator [J]. IEEE Xplore, 1989, 37(12): 1987-1990.
- [12] LUISE M, REGGINNAINI R. Carrier frequency recovery in all-digital modems for burst mode transmissions[J]. IEEE Xplore, 1995, 43(2): 1169-1178.
- [13] MENGALI U, MORELLI M. Data-aided frequency estimation for burst digital transmission [J]. IEEE Xplore, 1997, 45(1):23-25.
- [14] GONG Y Zh, ZHOU X L, SU X D, *et al.* A high-precision rife algorithm[J]. Radio Engineering, 2013, 43(2): 30-33 (in Chinese).
- [15] SHAN F H. Compensation technology of doppler frequency shift in space coherent laser communication [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 16-20 (in Chinese).