

5G 低轨卫星移动通信系统多普勒频偏估计算法

李耀晨, 赵渊, 裴文端

(中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050000)

摘要: 随着卫星移动通信系统近些年的快速发展, 高传输速率、广泛覆盖范围、较低的传输时延以及较强灵活性是新一代的 5G 低轨 (LEO) 卫星移动通信系统发展的要求, 但是由于低轨卫星移动速度很快, 产生了较大的多普勒频移; 通过建立使用 5G 候选波形滤波的正交频分复用技术 (F-OFDM) 的新型低轨卫星移动通信系统, 针对该新型系统设计一种新的多普勒频偏估计方法, 首先借助卫星轨道的多普勒特性来计算整数多普勒频偏, 第二步借助 F-OFDM 资源块中的导频信息来估计精确的多普勒频移; 主要完成了 5G 低轨卫星移动通信系统模型的建立与算法在系统中的仿真来验证其实际性能, 经过仿真可以得到, 本算法与同类算法相比计算复杂度低且精度较高。

关键词: F-OFDM; 低轨卫星; 多普勒特性; 导频

A Doppler Shift Estimation Scheme for 5G-LEO Satellite Mobile Communication System

Li Yaochen, Zhao Yuan, Pei Wenduan

(54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: With the rapid development of satellite mobile communication systems in recent years, high transmission rate, wide coverage, low transmission delay and strong flexibility are the requirements for the development of the new generation of 5G LEO satellite mobile communication systems. However, due to the high speed of the low orbit satellites, the larger Doppler shift is generated. By establishing a new low orbit satellite mobile communication system using 5G candidate waveform filtering orthogonal frequency division multiplexing (F-OFDM), a new Doppler frequency offset estimation method is designed for the new system. First, the Doppler characteristic of satellite orbit is used to calculate the integer Doppler frequency offset, and the second step is using the pilots information in the F-OFDM resource block to estimate the accurate Doppler shift. The pilot information is used to estimate the exact Doppler shift. This paper mainly completes the model of 5G low orbit satellite mobile communication system and the simulation of the algorithm in the system to verify its actual performance. The algorithm performance can be obtained through simulation, compared with the similar algorithm, the algorithm has low complexity and high accuracy.

Keywords: F-OFDM; LEO satellite; Doppler Characterization; pilot

0 引言

随着卫星移动通信系统近些年的不断发展, 军民用户对于新一代的高传输速率、广泛覆盖范围、较低的传输时延以及较强灵活性的 5G 低轨 (LEO) 卫星移动通信系统的需求日益增长。相比于地面通信系统, LEO 卫星移动通信系统覆盖范围更加广泛, 多颗低轨卫星即可实现全球无缝覆盖; 而相比于地球同步轨道 (GEO) 和中轨道 (MEO) 卫星移动通信系统, LEO 卫星移动通信系统又具有较低时延和灵活的网络调度的优点。由于单颗 LEO 卫星对地面的覆盖范围远小于 GEO 卫星, 需要数十颗甚至数百颗 LEO 卫星才可以实现全球无缝覆盖。但是低轨卫星由于距离地球较近, 信号传输时延得以大大降低, 信号功率的衰减也大大降低, 较低的卫星信号发射功率即可满足需求, 降低了卫星和地面终端的设计成本和复杂度。低轨卫星的传输信号深衰落相比 GEO 卫星较小, 具有更好

的性能。而目前低轨卫星移动通信系统的发展已经由话音和短消息向高速宽带业务发展, 多媒体宽带通信业务已经成为了下一代低轨卫星移动通信系统的发展需要, 这方面具有很大的市场潜力, 也是目前卫星移动通信技术研究的一个热点方向。

而未来的移动通信中, 5G 的新技术可以满足更加复杂的应用场景和业务, 其拥有较高频谱利用率的新型传输技术可以用于新型的 5G 低轨卫星移动通信系统。其中以华为在 OFDM 的基础上提出的 F-OFDM 技术能同时满足下一代卫星要求的高频谱利用率的要求。F-OFDM 是一种以 OFDM 作为基础, 将 OFDM 的子载波划分为若干子带, 对其采取滤波来降低带外泄漏的一种新型非正交载波技术。F-OFDM 系统继承了 OFDM 系统的许多优点, 满足了未来 5G 通信对物理层传输技术的要求。其基本思想是对现有 OFDM 技术的一种演进, 在发送端和接收端将子载波根据需求划分为若干个子带, 对每个子带进行滤波操作, 使得 F-OFDM 系统有较高的频谱效率, 同时可以灵活应对不同的业务需求。F-OFDM 有着比 OFDM 更低的带外泄露和更高的多用户性能。与其他 5G 候选波形相比, F-OFDM

收稿日期: 2018-07-11; 修回日期: 2018-08-08。

作者简介: 李耀晨 (1994-), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事卫星移动通信方向的研究。

与 OFDM 在技术原理上最为接近, 最适合完成从 4G 技术到 5G 技术的平滑过渡和演进。文献 [14] 中提出了一种可行的演进方案, 在 5G 实现商用的初期, 为了避免大范围更换现有的 4G 基站等通信设备, 将 4G 网络中作为保护间隔的 10% 系统带宽使用 F-OFDM 系统来传输数据。而随着 5G 技术的进一步推广和 4G 的逐渐演进, 逐步将更多系统资源分配给 5G 系统中的 F-OFDM 系统, 以此方式逐步完成从 4G 到 5G 技术的全面演进, 从而将频谱利用率进一步提高。F-OFDM 系统本身的前向兼容性和后向兼容性很好, 可以和 4G 技术实现共存, 一直到 4G 技术完成到 5G 的全面演进^[1]。

然而, 由于地面移动终端和低轨卫星之间的相对移动速度很大, 所以产生了非常大的多普勒频移, 低轨卫星移动通信系统的性能受到了严重影响。所以, 5G 低轨卫星移动通信系统的一项需要解决的重要问题是多普勒频偏的估计和消除。目前对于 F-OFDM 频偏估计算法的研究文献和资料较少, 许多基于 OFDM 的多普勒频偏估计法应根据 F-OFDM 的卫星移动通信系统进行进一步研究。

在过去的研究中, 多普勒频偏估计方法主要针对 OFDM 系统设计。文献 [2] 提出一种利用二阶差分方法来估计多普勒频偏的方法, 但这种方法对大多普勒频偏很敏感。文献 [3] 提出了一种最大似然估计法, 估计的精确度很高但是计算复杂度很高。文献 [4] 提出了一种针对 OFDM 系统的快速多普勒频偏跟踪补偿法, 借助 OFDM 的循环前缀来实现频偏粗估计, 借助子载波导频来实现频偏的精确估计。文献 [5] 提出了一种最大后验频偏估计法, 借助多普勒特性和循环前缀两步来实现频偏的估计。本文结合了快速多普勒频偏跟踪补偿法和最大后验的估计法, 先通过多普勒特性估计整数倍频偏, 再借助子载波导频实现频偏的精确估计, 计算精度高且复杂度低, 与其他现有的频偏估计算法相比具有一定优势。

1 F-OFDM 系统模型

在 F-OFDM 系统中, 滤波器处理的对象是每个子载波块, 和 LTE (Long Term Evolution, 长期演进) 系统中的资源块 (Resource Block, RB) 相似。因此, F-OFDM 信号的处理是通过资源块作为基本单元实现的。图 1 是 OFDM 系统发射端和接收端的框图, 图 2 是 F-OFDM 系统接收端和发射端框图。

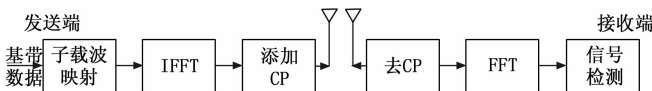


图 1 OFDM 框图

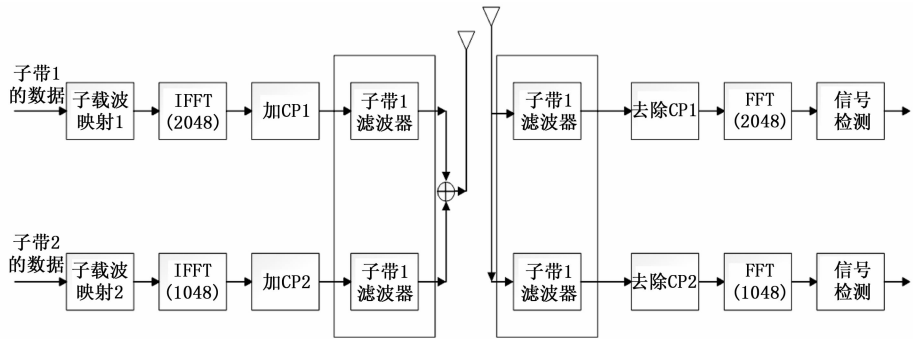


图 2 F-OFDM 系统框图

(CP) 操作后表示为:

$$s(n) = \sum_{i=0}^{L-1} s_i(n - l(N + N_g)) \quad (1)$$

其中:

$$s_i(n) = \sum_{m=m}^{m+M-1} d_{lm} e^{j2\pi mn/N}, \quad -N_g \leq n < N \quad (2)$$

N_g 是添加的 CP 的长度, L 代表 OFDM 符号个数, d_{lm} 是第 l 个 OFDM 符号中映射在序号为 m 的子载波上的数据, $\{m', m+1', \dots, m'+M-1\}$ 为有效子载波映射范围。

所以, 第 i 个子带的 F-OFDM 符号可以表示为

$$x_i(n) = s_i(n) * f_i(n), \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (3)$$

在 F-OFDM 系统中, 发送端对每个子带进行独立的调制和滤波, 根据具体的应用环境和场景来灵活分配每个子带的大小。所以子带滤波器的设计也是 F-OFDM 系统的一个研究重点, 必须同时考虑时域特性、频域特性和滤波器实现的复杂度, 而其频域特性是子带滤波器设计的最重要问题, 需要满足在频域可以实现较好的滤波处理, 降低每个子带的带外泄露。同时实现复杂度不能过高, 否则 F-OFDM 将难以在 5G 中广泛应用。本文 F-OFDM 系统假设使用理想的低通滤波器进行仿真研究。

$s_i(n)$ 是对第 i 个子带进行滤波处理之前的数据, $f_i(n)$ 为第 i 个子带的滤波器的冲激响应。然后对不同子带产生的数据 $x_i(n)$ 在时域相加之后表示为:

$$x(n) = \sum_{i=0}^{k-1} x_i(n) \quad (4)$$

本文假设信道环境是存在较大多普勒频移的 AWGN (加性高斯白噪声) 信道, 因此, 收到的数字信号可以表示为:

$$\begin{aligned} r(n) &= x(n) * h(n) + z(n) = \\ &= h(n) * \sum_{i=0}^{k-1} S_i(n) * f_i(n) + z(n) = \\ &= h(n) * \sum_{i=0}^{k-1} f_i(n) * \sum_{m=n}^{m+M-1} d_{l,m} e^{j2\pi mn/N} + z(n) \end{aligned} \quad (5)$$

对于低轨卫星移动通信 F-OFDM 系统, 由于会存在较大多普勒频移, 各个子载波间会存在严重干扰, 系统性能会急剧下降, 传输的误比特率提高, 必须提出一种适合新传输技术的复杂度低且精确度高的新型频偏估计算法^[6-7]。

2 低轨卫星的多普勒特性

LEO 卫星在约 1000 公里高度的圆周轨道以恒定速度围绕地球旋转, 在地面位置信息已知的情况下, 多普勒频移很容易就可以计算出来。卫星在其轨道任意一点 P 处的多普勒频移可以由下式分析计算来得出:

$$f_D = -\frac{f}{c} \cdot \frac{\omega_F(t)r_E r \sin[\psi(t) - \psi(t_0)]\eta(\theta_{\max})}{\sqrt{r_E^2 + r^2 - 2r_E r \cos[\psi(t) - \psi(t_0)]}\eta(\theta_{\max})} \quad (6)$$

其中:

$$\eta(\theta_{\max}) = \cos[\cos^{-1}\left(\frac{r_E}{r}\cos\theta_{\max}\right) - \theta_{\max}] \quad (7)$$

r_E 是地球半径, r 是卫星轨道半径, $\psi(t) - \psi(t_0)$ 是地球表面沿卫星轨道估计的角距离, θ_{\max} 表示最大仰角, $\omega_F(t)$ 是卫星的角速度。这里 $\omega_F(t)$ 可以近似为一个常数:

$$\omega_F = \omega_s - \omega_E \cos(i) \quad (8)$$

这里 ω_s 是卫星运动的平均角速度, ω_E 是地球旋转的角速度, i 是卫星轨道倾角。

假设卫星通信使用 S 波段的 2.4 GHz 的频率。通过上两个公式, 可以计算出多普勒特性曲线如图 3 所示。多普勒频移是一个关于卫星移动的角度和最大仰角的函数。可以看出多普勒频移是一个关于时间和最大仰角的 S 形曲线函数。多普勒特性曲线可以相对地面固定终端的位置得到一个较精确的频移值, 但是对于移动终端, 其位置的变化会导致其多普勒频移是变化的, 多普勒特性便无法再得到一个相对精确的估计值。举例来说, 对于低轨卫星移动通信系统, 移动终端以 0~500 公里每小时的速度移动, 多普勒特性曲线将会产生 1 kHz 左右的误差, 这将是无法被接受的。因此, 新一代 F-OFDM 低轨卫星移动通信系统需要对多普勒频偏有一个精确的估计值^[8]。

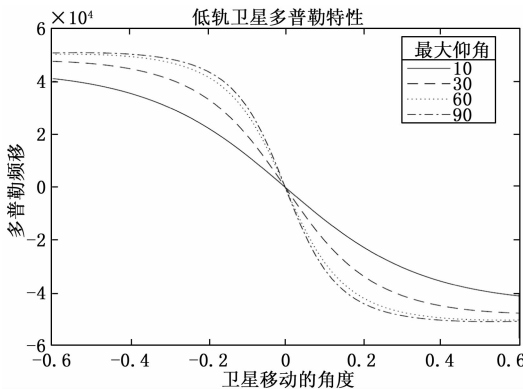


图 3 低轨卫星的多普勒特性曲线

3 快速跟踪多普勒频偏估计法

3.1 整数频偏估计

在低轨卫星移动通信系统中, 虽然从多普勒特性曲线中估计得到的多普勒频移对于移动终端不够精确, 但其误差范围很小 (小于 1 kHz), 可以被限制在半个载波间隔之内 (LTE 系统是 7.5 kHz)。从多普勒特性中可以得到载波

频偏的一个大致范围, 如果多普勒特性得出一个估计值 67.3 kHz, 实际频移可能在 66.8~67.8 kHz 之间变化, 然后归一化频率的变化范围是 4.453 3~4.52, 则可能的归一化载波频移值是 4 或 5。由此即可从多普勒特性估计出一个整数频偏, 可以通过导频估计算法更进一步地估计得出精确的多普勒频偏^[9]。

3.2 基于导频的快速跟踪频偏估计算法

导频是在发送端 F-OFDM 符号一些特定位置的子载波上添加的一些固定数据, 文献 [10] 中提出了利用导频实现频偏粗同步的方法, 根据这种思想, 可以在 F-OFDM 系统的一些子载波上添加一些导频符号来实现对多普勒频偏的小数倍估计。

在忽略时间误差和采样时钟误差的条件下, F-OFDM 卫星移动通信系统接收机接收的信号可表示为:

$$y_k = x_k \exp[j(\Delta\theta + \theta)] + n_k \quad (9)$$

其中: $\Delta\theta$ 是频偏引起的相位角变化量, 而由频偏引起的子载波间干扰被等效为噪声 n_k 。从式中可以看出, 多普勒频偏会使接收到的卫星信号产生一个相位旋转 $e^{j\Delta\theta}$, 所以基于这一点, 可以利用相邻两个 F-OFDM 符号中的导频相位变化量来估计出小数频偏, 即通过求前后两个相邻 F-OFDM 符号的导频的相关函数来得到多普勒频偏引起的导频的相位变化量^[11]:

$$\Delta_k = y_k \cdot y_{k+1}^* = e^{j\Delta\theta} |x_k|^2 \quad (10)$$

然后求平均的导频相位差:

$$\varphi = \arg\left[\sum_{k \in P} \Delta_k\right] \quad (11)$$

其中: P 是符号中导频位置的集合。由此可得精确频偏为:

$$\epsilon = \frac{\varphi}{2\pi t} \quad (12)$$

该基于导频的方法的在 F-OFDM 系统中频偏的估计范围为 $[-\frac{1}{2t}, \frac{1}{2t}]$, 其中 t 是采样间隔。

若上述公式中的 2 个导频符号分别取自第 n 个 F-OFDM 符号和第 $n+D$ 个 F-OFDM 符号, 假设多普勒频偏随时间的变化率较低, 此时第 n 个符号和第 $n+D$ 个符号之间的频偏可以近似认为是不变的, 可以得到精确的小数频估计值为:

$$\epsilon = \frac{\varphi}{2\pi t D} \quad (13)$$

小数倍多普勒频偏估计的范围为 $[-\frac{1}{2tD}, \frac{1}{2tD}]$ 。

4 系统仿真

分别采用基于循环前缀的最大似然估计的方法和上面所述的基于导频的方法进行频偏估计, 使用 MATLAB 搭建了使用 F-OFDM 传输技术的低轨卫星移动通信系统, 对它们在 AWGN 信道下的性能进行了仿真。仿真采用的参数为: 子载波数 $N=600$, 子带数 $L=12$, 每个子带 50 个子载波, 每个子带插入一个导频符号, 信噪比 12 dB, 使用

QPSK 调制, 子载波间隔为 15 000 Hz。仿真图中, 横坐标是加入频偏的真实值, 单位是赫兹 (Hz), 纵坐标是估计所得频偏的相对于真实频偏的误差。基于循环前缀的最大似然估计频偏的方法的仿真结果如图 4 所示, 基于上面所述的导频子载波估计频偏的方法仿真结果如图 5 所示。

由下两图可明显看出, 与过往 OFDM 系统经常使用的基于循环前缀的最大似然频偏估计算法相比, 上面所述的基于导频子载波的频偏估计方法在 1 kHz 的频偏范围内都能得到更精确的频偏估计值, 再结合第一步中的通过低轨卫星多普勒特性所得到的能精确到 1 kHz 左右的频偏粗估计值, 便可以快速得到低轨卫星和地面终端在某一时刻时的精确的多普勒频偏值。同时在图 5 中可以看到, 子带中插入导频间隔的 F-OFDM 符号数越小, 对时变的频偏的估计精度越高, 而频偏随时间变化较缓慢时, 可以增大插入导频间隔的 F-OFDM 符号数, 从而提高系统性能。同时在精度满足估计需求条件下, 与计算复杂度很高的基于循环前缀的最大似然频偏估计方法相比, 基于卫星多普勒特性和导频的快速多普勒频偏估计算法的计算复杂度大大降低。

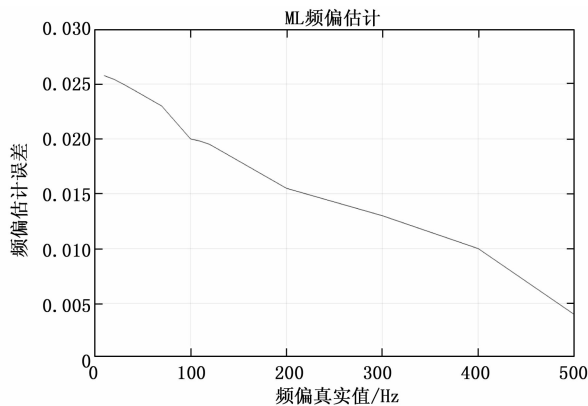


图 4 ML 频偏估计算法的估计误差

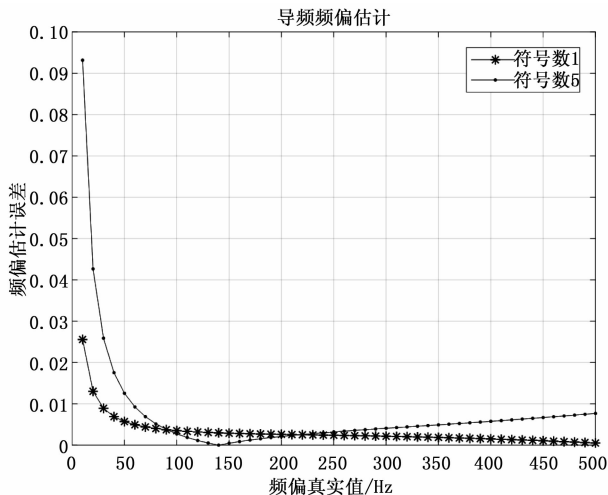


图 5 基于导频的频偏估计算法的估计误差

5 结论

为了满足用户终端对移动通信业务的要求, 低轨卫星移动通信系统现已成为空天地一体化信息网络系统的重要组成部分。本文结合国内外同类型课题的研究现状, 针对当前低轨卫星移动通信系统使用的传输技术的不足, 提出了一种采用 5G 新型 F-OFDM 传输技术下的低轨卫星移动通信系统, 并提出对新型系统的多普勒频偏干扰快速估计的算法。

全文主要完成了 F-OFDM 系统与卫星移动通信系统相结合的仿真模型在 MATLAB 下的搭建, 以此基础提出了一种新的 5G 低轨卫星移动通信系统多普勒频偏估计算法。该算法分为两步: 第一步, 采用低轨卫星多普勒特性对多普勒频偏进行粗估计; 第二步, 采用导频相关的方法对多普勒频偏进行精估计。通过理论分析、仿真验证了该算法计算复杂度较低, 对于低轨卫星多普勒频偏具有较好的估计性能。

与近年来针对低轨卫星多普勒频偏的多种估计算法相比, 本算法较使用循环前缀的最大似然法大大降低了计算复杂度, 同时提高了精度。与利用循环前缀的二阶差分估计多普勒频率变化率的算法相比, 也是具有较低的计算复杂度, 同时精度基本相当, 与同类型估计算法相比, 本算法最大优势在于精度满足估计要求的同时大大降低了计算复杂度。

本文尽管对新一代使用 F-OFDM 技术的低轨卫星移动通信系统进行了研究, 但主要研究重点在与多普勒频偏估计算法, 此外仍有许多关键问题需要进一步完善, 例如 F-OFDM 系统给的子带滤波器的设计和波形与多址技术的联合设计等等一系列的关键问题^[12-13]。

参考文献:

- [1] Schaich, Frank, Wild, Thorsten. Waveform contenders for 5G - OFDM vs. FBMC vs. UFMC [A]. International Symposium on Communications, Control and Signal Processing [C]. 2014: 457-460.
- [2] Xu M J, He Y Z, Wang C, et al. Doppler rate estimation scheme for UFMC based LEO satellite communication system [A]. IEEE International Conference on Computer & Communications [C]. 2017: 1-5.
- [3] Jan-Jaap B, Magnus S, Per O B. ML Estimation of time and frequency offset in OFDM systems [J]. IEEE Trans. Signal Process, 1997, 45 (7): 1800-1805.
- [4] Li J H, Zhang Y F, Zhang Y, et al. Fast tracking Doppler compensation for OFDM - Based LEO satellite data transmission [J]. IEEE International Conference on Computer & Communications, 2017: 1814-1817.
- [5] Lin J N, Hou Z W, Zhou Y Q, et al. MAP estimation based on Doppler characterization in broadband mobile LEO satellite communications [A]. Vehicular Technology Conference [C]. 2016: 1-5.