

空间信道特性对卫星网络协议的影响分析

张胜磊¹ 刘淑茜² 沈红娟¹

(1 北京航天飞行控制中心 2 中国人民解放军 63999 部队)

摘要 空间信道特性对卫星网络协议性能具有重要影响, 由此初步分析卫星链路大延迟、各种损耗造成的链路高误码率和卫星抖动等几个重要因素对网络协议及其性能造成的影响, 其结果可供卫星网络设计工作参考。

关键词 信道 延迟 影响 卫星网络协议

1 时延对网络协议的影响

1.1 时延对路由和传输协议的影响

空间信道的大时延会直接影响到空间网络路由协议和传输协议的正常运行, 因为路由协议和传输协议经常使用定时器触发各种操作。

地面网络中, 网络分布范围较小, 信道传播时延较小, 路由协议包在网络中广播扩散时, 可以很快到达网络中的每个节点。而卫星网络中, 网络分布范围很大, 节点之间的传播时延很大, 路由协议包在网络中扩散时, 需要相当一段时间才能到达每个节点。这个网络扩散时延是路由协议快速收敛需要考虑的一个上限。同时, 卫星网络是一个拓扑快速变化的动态网络, 每一个拓扑保持不变所持续的时间, 我们称之为一个网络拓扑时间片。随着不同参数的星座, 卫星网络拓扑时间片的分布规律也不同, 这个网络拓扑时间片就是网络协议快速收敛设计需要考虑的一个下限。

对于传输层协议, 空间环境的大延时和大带宽延时积对传统协议的负面影响主要体现在两个方面: 增加了慢启动持续的时间, 降低了带宽利用率。在理想状况下, 即没有分组丢失的情况下, 传统 TCP 协议慢启动期间的信道的利用率与带宽延时乘积成反比。整个慢启动期间的平均利用率为:

$$utilization = \frac{\sum_{n=0}^{\log_2 rwnd} 2^n \times packetsize \times 8}{bandwidth \times RTT \times \log_2 rwnd} \quad (1)$$

式中, $utilization$ 为信道利用率, $rwnd$ 为接收端通告窗口, $bandwidth$ 为信道有效带宽, RTT 为环路时间, $packetsize$ 为传输的包长度。慢启动持续的时间为:

$$t = RTT \times \log_2 rwnd \quad (2)$$

从式中可以看出, 随着环路时间的增长, 慢启动持续时间增长, 信道利用率下降。对于带宽和接收端通告窗口相同的情况, 卫星网络与地面网的慢启动持续时间之比为两者 RTT 之比:

$$r_{duration} = \frac{RTT_{SAT} \times \log_2 rwnd}{RTT_{TER} \times \log_2 rwnd} = \frac{RTT_{SAT}}{RTT_{TER}} \quad (3)$$

卫星网络与地面网的信道利用率之比为两者 RTT 的反比

$$r_{utilization} = \frac{\log_2 rwnd}{\sum_{n=0}^{\log_2 rwnd} 2^n \times packetsize \times 8 / bandwidth \times RTT_{SAT} \times \log_2 rwnd} \div \frac{\log_2 rwnd}{\sum_{n=0}^{\log_2 rwnd} 2^n \times packetsize \times 8 / bandwidth \times RTT_{TER} \times \log_2 rwnd} = \frac{RTT_{TER}}{RTT_{SAT}} \quad (4)$$

对于卫星网络和地面网典型的环路时间值来说, 慢启动持续时间之比大于 5, 信道利用率之比则小于 0.2。可以看出, 长延时的特性使得传统 TCP 协议在卫星网络上运行的效率远低于其在地面网上运行的效率。

1.2 时延抖动对网络协议的影响

时延抖动对卫星网络的路由协议没有直接的影

响,因为路由协议一般都是分布式处理,每个卫星节点只处理自己收到的协议包,与其他卫星节点的操作没有关系。但是时延抖动对传输层协议有直接影响,尤其是面向连接的 TCP 协议。因为 TCP 协议需要源节点和接收节点,根据网络状态以及对方状态发送数据。

在 TCP 协议中,RTT 的准确估计是非常重要的。首先,TCP 中的超时重传定时器(RTO)的时间设定是建立在当前和历史 RTT 估计值的基础上的。RTT 的估计值不准确,会导致 RTO 设定的不合适:RTO 过大,TCP 响应时间很慢,出现丢包时无法及时重传;RTO 过小,则容易在 ACK 包到达之前出现不应有的超时,并进入慢启动状态,这两者都将引起 TCP 性能下降。卫星网络链路延时的持续变化,使得 TCP 协议中 RTT 的准确估计更加困难,影响协议性能。

2 信道高误码率对网络协议的影响

我们知道,空间信道的大部分特性,如损耗、衰

落、噪声、干扰、雨衰、遮挡等,对信道产生的直接效果就是高误码率。因此有必要对空间信道进行模拟和仿真,分析高误码率对网络协议的影响。

2.1 空间信道误码率模型

星际链路可以被视为加性高斯信道,信息论和数字通信系统对加性高斯信道条件下的误码性能有完备的理论推导和计算公式,对于该信道的仿真非常方便。通过仿真设置中的发射机发射功率、发射天线增益、收信机接收灵敏度、接收天线增益、链路损耗、频段、信道编码方式、调制方式等,可以实时的推出星间链路的误码率。

星地链路的情况就要复杂许多,卫星星地信道特性包括传播损耗、衰落、多普勒频移、噪声等特性。其中传播损耗由自由空间传输损耗、极化损耗等造成,衰落由信号的多径效应和多普勒频移造成,而多普勒特性影响调制方式,噪声由天线噪声以及干扰等造成。根据有关卫星信道的理论研究,卫星信道可用多种模型建模,本文利用 SIMULINK 软件建立一卫星通信系统仿真模型,如图 1 所示。

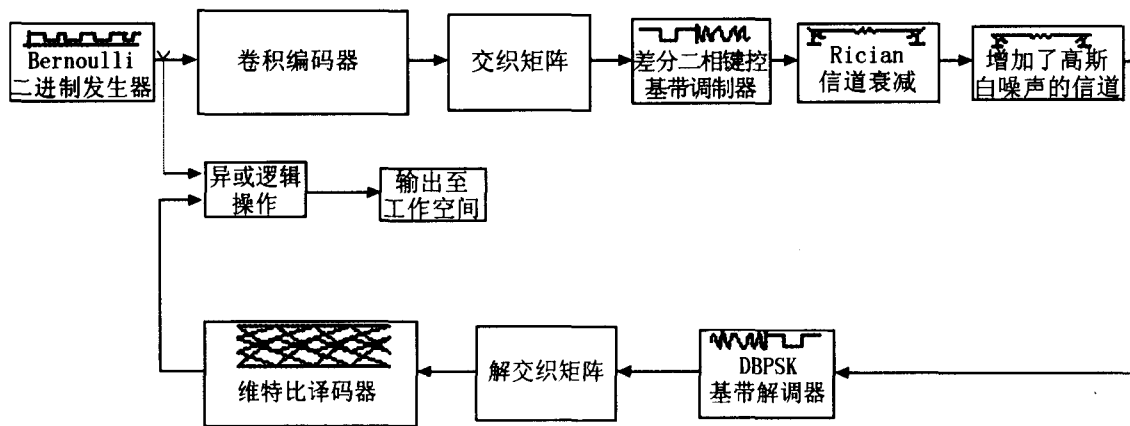


图 1 卫星信道的 SIMULINK 仿真模型

该模型为一通用型模型。仿真中假定信源为具有 Bernoulli 分布的二进制数据流,信号经过卷积编码及交织处理以后,送到调制模块。低轨系统中,由于有较大的多普勒效应的影响,调制方式采用差分相位调制。调制信号首先经过一衰落信道模型以后,再经过 AGWN 模块,经过解调、解交织、维特比译码以后,与发送信号进行对比,从而获得误码图案。

下面我们使用上述模型,建立仿真场景,获得空间信道的误码特性,或误码分布函数。

仿真场景:二进制数据率:64kbps;调制方式:DBPSK;多普勒频移:1500Hz;信噪比(E_b/N_0):12dB;莱斯因子:1.0;无信道编码;

仿真结果:

(1)平均误码率:0.0247;

(2)单位长度(2000bt)内误码时间发生次数的概率分布。

其中,图 2、图 4 和图 5 中的 r, p 分别对应二项式分布的参数 r 和 p ,横坐标表示发生误码次数的数

值, 纵坐标表示其概率密度; 图 3 中的 μ 和 σ 分别对应正态分布中的参数 μ 和 σ , 横坐标表示误码的长度, 纵坐标表示其概率密度分布。

如图 2 经过数据拟合以后可获得误码时间的概率分布(图中连续曲线所示), 误码事件的次数 x 在每个 2000bt 内服从负二项式分布:

$$f(x|r,p) = C_{r+x-1}^x p^r (1-p)^x I_0(x); \text{ (当 } r \text{ 为整数)} \quad (5)$$

$$f(x|r,p) = \frac{\Gamma(r+x)}{\Gamma(r)\Gamma(x+1)} p^r (1-p)^x I_0(x) \quad (6)$$

(当 r 为非整数)

其中函数 $\Gamma(x)$ 为: $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \quad (7)$

$I_0(x)$ 为第一类贝塞尔函数:

$$I_0(x) = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{1}{k! \Gamma(v+k+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+v} \quad (8)$$

图 3 为误码长度的分布及其拟合曲线, 其中拟合曲线服从对数正态分布, 即长度 x 的分布服从:

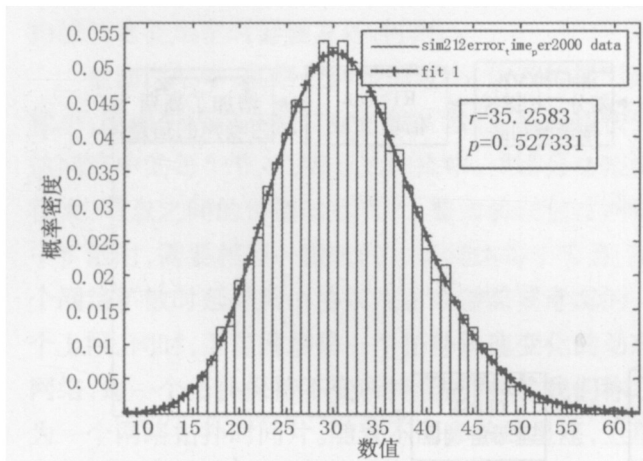


图 2 突发误码事件次数的负二项式分布拟合

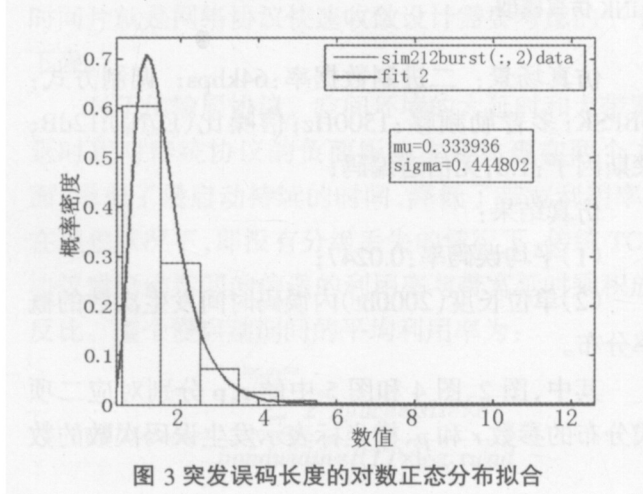


图 3 突发误码长度的对数正态分布拟合

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

本例中概率函数的参数为 $\mu=0.333936, \sigma=0.44482$ 。突发误码长度如果用负二项式分布(长度值减 1)拟合, 拟合情况如图 4。

(3) 间隔长度分布为负二项式分布, 如图 5 所示。

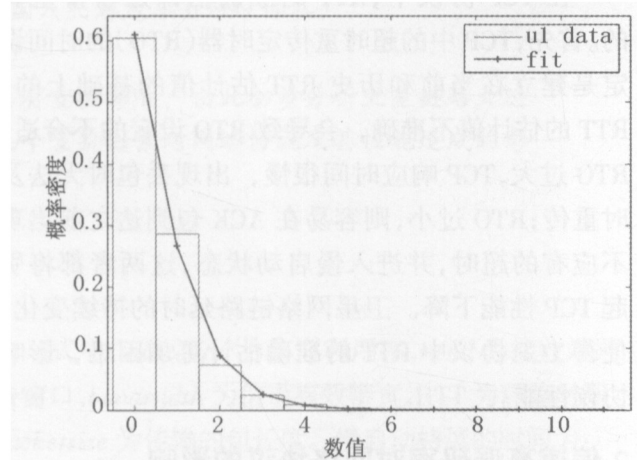


图 4 突发误码长度的负二项式分布拟合

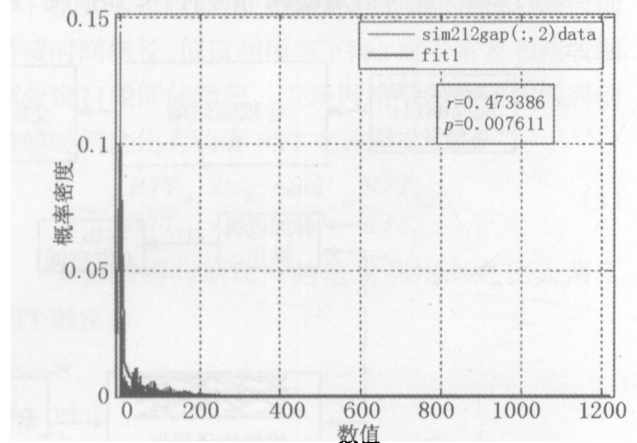


图 5 间隔长度的负二项式分布拟合

$$f(x) = C_{r+x-1}^x p^r q^x I_{(0,1)}(x) \quad (10)$$

当 r 为非整数时, $f(x) = \frac{\Gamma(r+x)}{\Gamma(r)\Gamma(x+1)}$ (11)

通过仿真结果进行分析, 可以得出以下结论:

- (1) 单位时间内误码事件发生次数的分布服从负二项式分布;
- (2) 误码事件发生时突发误码段的长度或者服从对数正态分布, 或者服从负二项式分布;
- (3) DBPSK 和 DQPSK 的误码分布情况基本相同;
- (4) 误码之间的间隔可用负二项式分布近似, 但误码间隔对平均误码率的影响不大。

2.2 信道误码对网络协议影响的分析

由上面的仿真实验和数值分析可知,在卫星网络中,太空环境对于卫星链路的影响不仅与太空环境有关系,而且还与卫星链路的数据传输速率、数据发射机发射的有效全向辐射功率、发射频率以及链路的长度、卫星的抖动情况有关。由于卫星本身的限制,特别是低轨卫星,限制了发射机的有效全向辐射功率。发射机发射频率越高,传输距离越大,数据的传输速率越快,则链路的误码率就越高,而过高的误码率会严重地影响卫星网络的通信质量。

3 卫星抖动对于链路信道特性的影响

由于空间环境的各种因素的影响,卫星在运动时会发生震动,这种震动又会影响到卫星平台上的卫星通信系统的发射天线,使其产生摆动,严重时会使通信中断,更多的时候使得通信系统的误码率增加,通信质量下降,甚至会达到无法进行通信的程度。

在卫星通信系统中,假设发射天线的发射波束是高斯波束。假设从发射天线处 O' 到接收天线的距离是 z ,在接收天线处波束半径为 $W(z)$;在接收平面的中心处(O)点光强为 I_0 , I_A 是接收平面上 A 点的光强, R_A 是从 A 点到中心 O 点的距离,如图 6 所示:

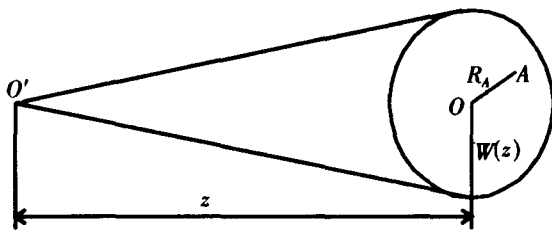


图 6 空间卫星通信系统各参量位置图

对于高斯波束,有:

$$I_A = I_0 \exp\left(-\frac{2R_A^2}{w^2(z)}\right) \quad (12)$$

而:

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

式中 w_0 为波束的腰斑半径, λ 是所用波束的波长。

假定在通信开始时,空间通信系统的瞄准系统已经开始发射,接收天线对准,当发射天线受到震动时,发射波束的中心从 O 点移动到 A 点,发射波束

中心移动的响应角度为:

$$\Delta\theta = \frac{R_A}{z} \quad (14)$$

假定在空间通信系统中选二元单极性码作为数字通信系统的码型,并且在下面的讨论中不考虑其它噪声。系统的判决电平可按通常的方法取为波束中心波强的一半,即:

$$I_\alpha = I_0/2 \quad (15)$$

且设由于震动使得接收到的光强变为 I_α , 所对应的 $\Delta\theta = \alpha$, $R_A = R_\alpha$ 则当接收到的波信号强度大于 I_α 时,信号被判别为“1”,;否则被判别为“0”。由前式可得:

$$R_\alpha = \frac{w(z)\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{2}} \quad (16)$$

所以有:

$$\alpha = \frac{w(z)\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{2} z} \quad (17)$$

如果发射波束的震动是一随机震动,其震动的角速度改变量 $\Delta\theta$ 的概率密度函数是一高斯分布,即:

$$P(\Delta\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp\left(-\frac{(\Delta\theta)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (18)$$

因为选择了二元单极性码,所以正常情况下发射“1”码时接收到的发射光强为 I_0 ,发射“0”码时接收到的光强为 0。如果震动使发射光束摆动时,发射“1”码时的连接光强 $I < I_\alpha = I_0/2$,就会误判为“0”码,而且 $\Delta\theta$ 为正或负的情况都是一样的,所以发射“1”码而被误判为“0”码的误码率 BER 为:

$$\begin{aligned} BER &= 2 \int_\alpha^\infty P(\Delta\theta) d(\Delta\theta) \\ &= 2 \int_\alpha^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp\left(-\frac{(\Delta\theta)^2}{2\sigma^2}\right) d\Delta\theta \end{aligned} \quad (19)$$

因为没有考虑其他噪声,易知发射“0”码而被误判为“1”码的误码率 $BER(1/0) = 0$ 。一般情况下,发射信号经过扰码后,“1”码和“0”码的数量基本相等的。

故有:

$$BER = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{w_0 \left[1 + (\lambda z / (\pi w_0^2))^2 \right]^{1/2} \sqrt{\ln 2}}{2\sigma z} \right] \right\} \quad (20)$$

在一般空间通信系统中, w_0 可以近似用发射天线的孔径来代替,约几厘米到几十厘米, z 则在数千

公里以上。首先取 $w_0=12.5\text{cm}$, $\lambda=800\text{nm}$, $z=1000\text{km}$, 则得到震动的标准方差与误码率的关系式, 如图 7 所示:

从图 7 中可以看出, 随着振动幅度的加大, 误码率在逐渐增大; 而且当振动幅度超过一定限度后, 误码率急剧增加。

由于卫星的抖动只与卫星本身和太空环境有关, 与链路本身的性能无关。故当链路本身误码率很低时, 则卫星的抖动产生的误码则是主要的误码率来源, 当卫星链路

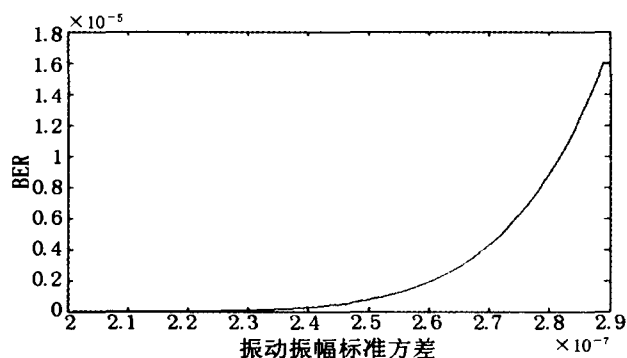


图 7 卫星震动幅度与误码率的关系曲线

本身的误码率很高而卫星抖动振幅较小时, 由于卫星的抖动产生的误码可以忽略不计。

4 结论

空间特性非常复杂, 本文首先对链路大延迟、各种耗损造成的链路高误码率和卫星抖动等三个因素进行了建模, 通过仿真研究了其对卫星网络协议性能产生的影响, 为后续的卫星网络协议的设计提供了有益的参考。

参考文献

- [1] 胡剑号, 吴诗其, 李乐民. 卫星移动通信系统中星际链路干扰分析模型, 通信学报, 1999, 20(2): 58-63
- [2] Christopher Ward etc. LEO Satellite Constellation Performance Analysis, IEEE GLOCOM, 1993: 742-747
- [3] 陈芳允, 贾乃华. 卫星测控手册, 北京: 科学出版社, 1993
- [4] 陈如明. 中、低卫星通信, 电信科学, 1997, 13(7): 44-48
- [5] Makus Werner, Georg Berndl and Bernhard Edmaier. Performance of Optimized Routing in LEO Intersatellite Link Network, VTC 97/MC2-6
- [6] Gragopoulos, E. Papapetrou and F.N. Pavlidou. Routing Techniques for Low orbit Satellite configurations, ICT'98.

(上接第 11 页)

判为积雪。这种方法在实际使用中比较繁琐。本文使用的是一个矩形模型, 应用灵活性得到提高。在云检测的基础上, 对晴空区域若 NDVI 大于 0.2 使用矩形模型进行林区积雪判识, 并结合 $11\mu\text{m}$ 波段的亮温 BT_{11} 小于 277K、 $1.6\mu\text{m}$ 通道的反照率 R_6 小于 0.15 的判据。 BT_{11} 和 R_6 的阈值可以根据季节和纬度调节, 如纬度在北纬 50 度以上的森林区, BT_{11} 的上限调低为 274K, 冬季 R_6 上限可降低到 0.10 到 0.12。

5 结论

根据“云动雪不动”的原理, 我们可以选取同一地区邻近时次的图像, 通过对比确定积雪, 进而验证本文雪盖监测的效果。由于在可见光波段, 光学厚度较大的云与雪面相似, 都具有较高的反射率。在近红外波段, 积雪吸收太阳辐射, 在 $1.55\mu\text{m}$ ~ $1.65\mu\text{m}$ 之间和 $2.1\mu\text{m}$ 附近反射率都达到最小, 而云反射太阳辐射, 云的反射率远大于积雪, 因此在 MODIS 通道 3 ($0.46\mu\text{m}$)、6 ($1.64\mu\text{m}$)、7 ($2.13\mu\text{m}$) 的合成图中, 雪的颜色会偏红。尽管冰晶云与积雪的光谱有些相似, 这

导致冰晶云在合成图中的颜色也偏红, 但是通过多光谱综合分析, 仍可以将其检测出来。通过理论研究和实际对比可以看出, 本文的算法能够改善和提高 MODIS 雪盖监测判读。

参考文献

- [1] 郝露, 王静爱. 中国雪灾时空变化及畜牧业脆弱性分析 [J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 42-48.
- [2] Groisman P.Y., Karl T.R., Knight R.W. Observed impact of snow cover on the heat balance and the rise of continental spring temperatures [J]. Science, 1994, 263: 198-200.
- [3] Chen Wen, Gray H.F., Huang Ronghui. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon [J]. Advances in Atmospheric sciences, 2000, 17(1): 48-60.
- [4] 叶笃正. 长期预报的一些物理因子 [J]. 气象, 1975, 3, 10-12.
- [5] 王建. 卫星遥感雪盖制图方法对比与分析 [J]. 遥感技术与应用, 1999, 14(4): 29-36.
- [6] 曹云刚, 刘闯. 从 AVHRR 到 MODIS 的雪盖制图研究进展 [J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(5): 15-19.
- [7] Klein A. G., Hall D.K., Riggs G.A. Improving snow cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model [J]. Hydrological Processes, 1998, 12(10-11): 1723-1747.