



感知识别

第一篇

射频识别技术
原理、协议及系统设计



第三章 RFID无线通信原理

射频识别技术
原理、协议及系统设计



3.1 射频频谱与电磁信号传输

3.2 信号的电压与能量

3.3 阅读器信号的调制与复用

3.4 反向散射机制与标签编码

3.5 链路预算

3.6 天线增益与极化对传输范围的影响

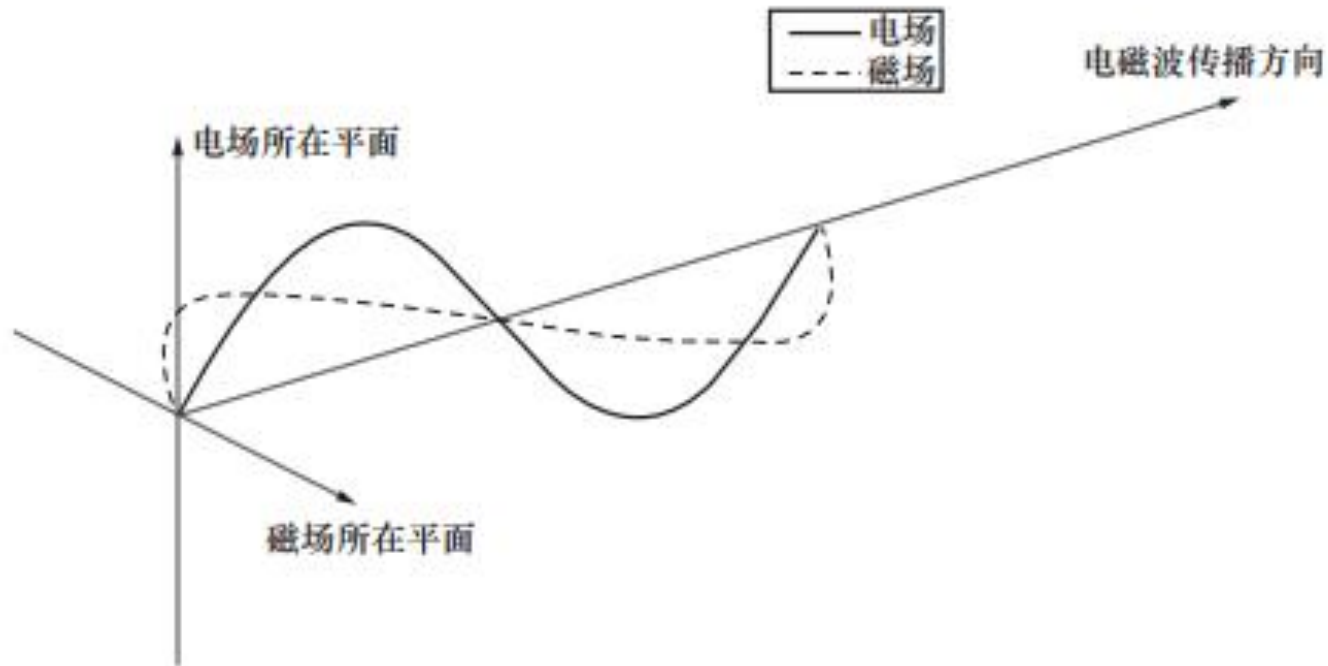
3.7 真实环境下的信号传输

3.8 小结

3.1 射频频谱与电磁信号传输



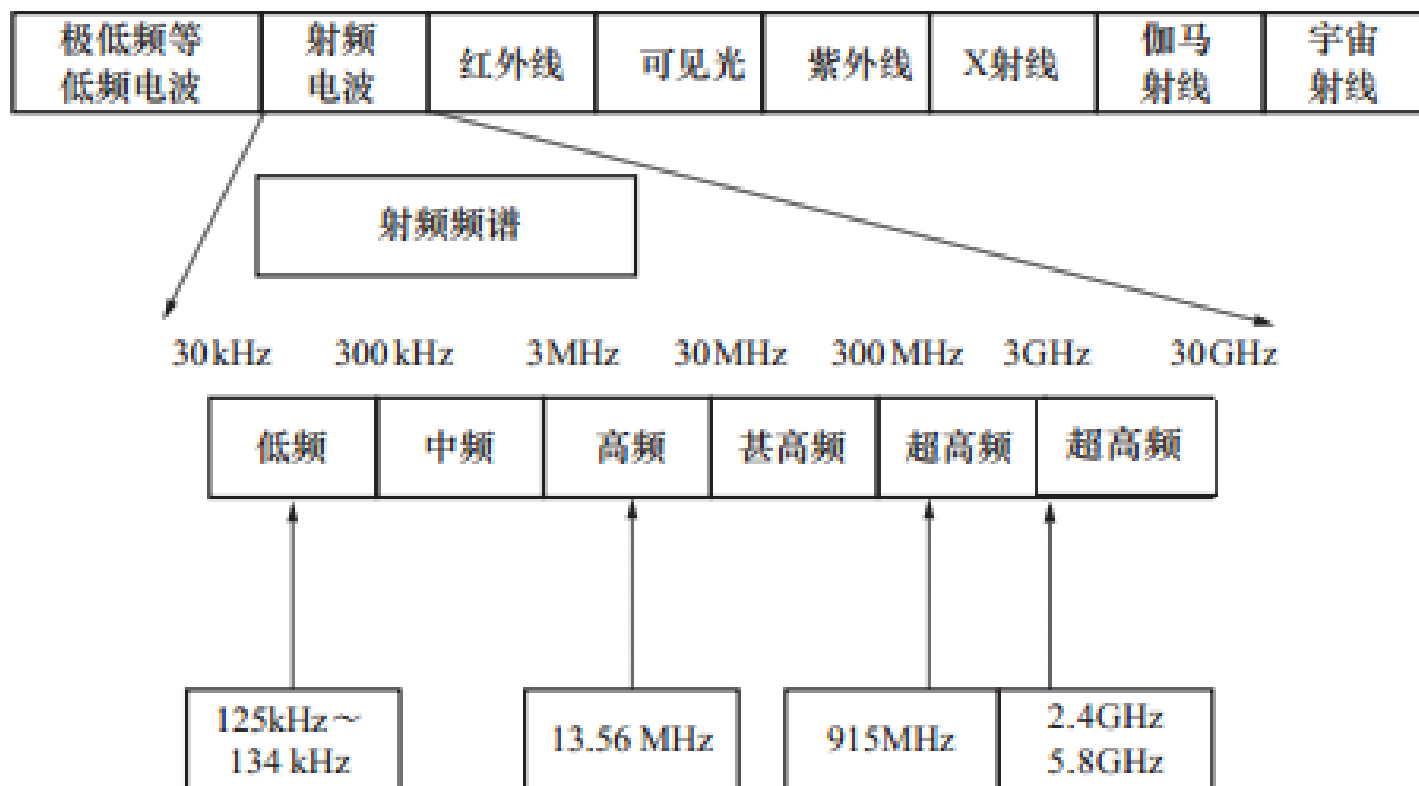
电磁波是由同相振荡且互相垂直的电场与磁场在空间中以波的形式传递能量和动量。



3.1 射频频谱与电磁信号传输



将各种无线信号**调制**到不同频率的载波信号中传输。



3.2 信号的电压与能量



变化电场可以通过电压或电流的时间函数来描述其变化方式

能量大小用功率表示，按照正弦规律变化的电场，可以用微积分计算一个周期的电流能量，再除以时间

$$V(t) = v_0 \cos(\omega t)$$

$$P = I \cdot V = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{av} = \frac{v_0^2}{2R}$$

3.2 信号的电压与能量



信号处理问题中，相对变化更值得关注。

用分贝(dB)代替瓦特(W)：

分贝是相对的，描述具体功率时需要加入参考功率，常用的是1毫瓦特(mW)，此处分贝大小为dBm

$$G_{\text{dB}} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}$$

$$\text{dBm} = 10 \lg \left(\frac{P}{1 \times 10^{-3}} \right)$$

3.3 阅读器信号的调制与复用



等幅波(Continuous Wave, CW):
一个简单的, 频率、相位、振幅
不发生变化的周期正弦信号。

它无法携带信息, 需要在这样的
周期信号上进行**调制**: $m(t)$ 含有基
带信息, 余弦为载波。

$$V(t) = m(t) \cdot \cos(\omega_c t)$$

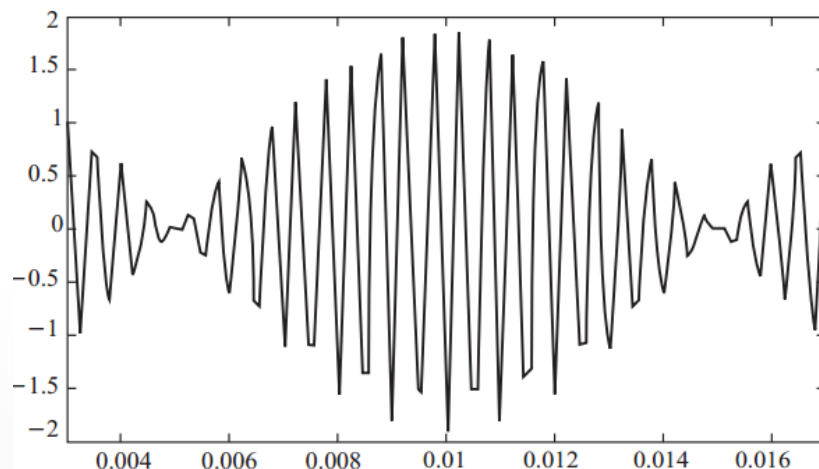
3.3 阅读器信号的调制与复用



当 $m(t)$ 也是正余弦信号时，根据三角函数关系，有：

这种正弦调制将信号分为两个信号，称为**边带**，一个频率高于载波（公式第一项），一个低于载波（公式第二项）。

$$\begin{aligned} V(t) &= \cos(\omega_m t) \cdot \cos(\omega_c t) \{ \omega_m \ll \omega_c \} \\ &= \frac{1}{2} \{ \cos[(\omega_c + \omega_m)t] + \cos[(\omega_c - \omega_m)t] \} \end{aligned}$$



3.3 阅读器信号的调制与复用

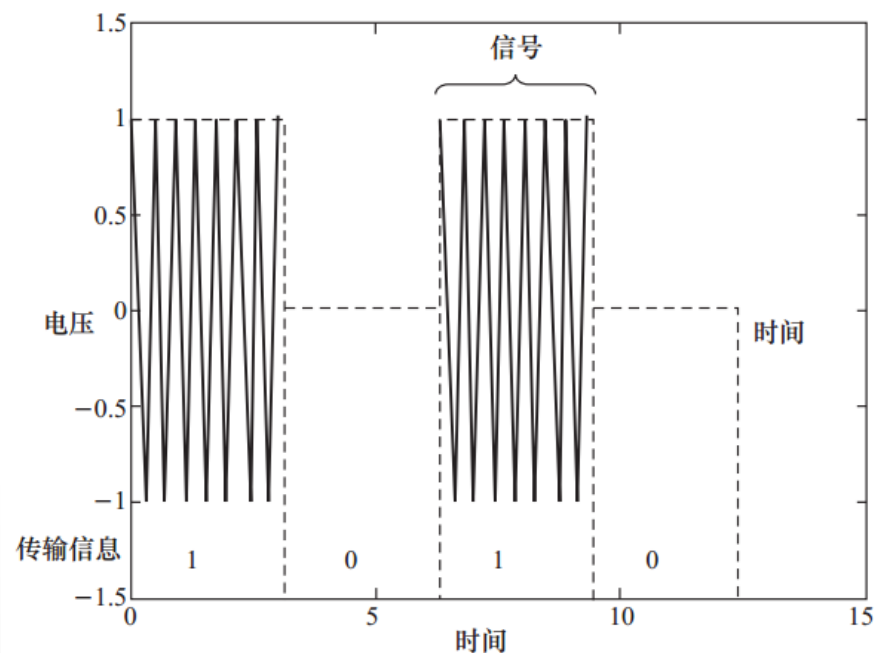


对RFID阅读器信号的调制一般执行的是
数位调变(Digitally Modulated)。

通断键控(On-Off Keying, **OOK**), 对“1”
保持高功率, “0”保持低功率。

对于某个实际的二进制串将会转化为一段
功率或高或低的电磁波。

OOK是否有问题?



3.3 阅读器信号的调制与复用



OOK对于RFID被动标签，数据位是0时能量低，无法激活标签，导致工作不正常。

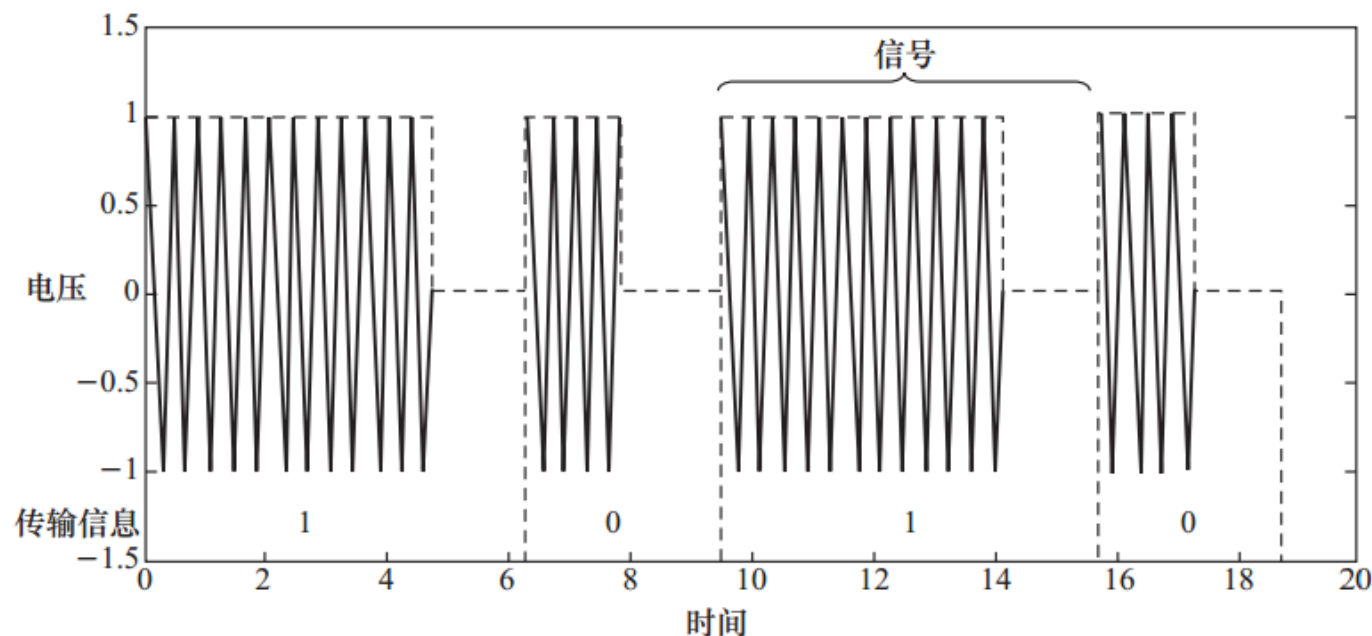
在调制之前对二进制数串进行编码。

脉冲间隔编码(PIE):

“1”：输出长时间的高功率跟随短暂的低功率

“0”：输出短暂高功率跟随短暂低功率

如何处理？

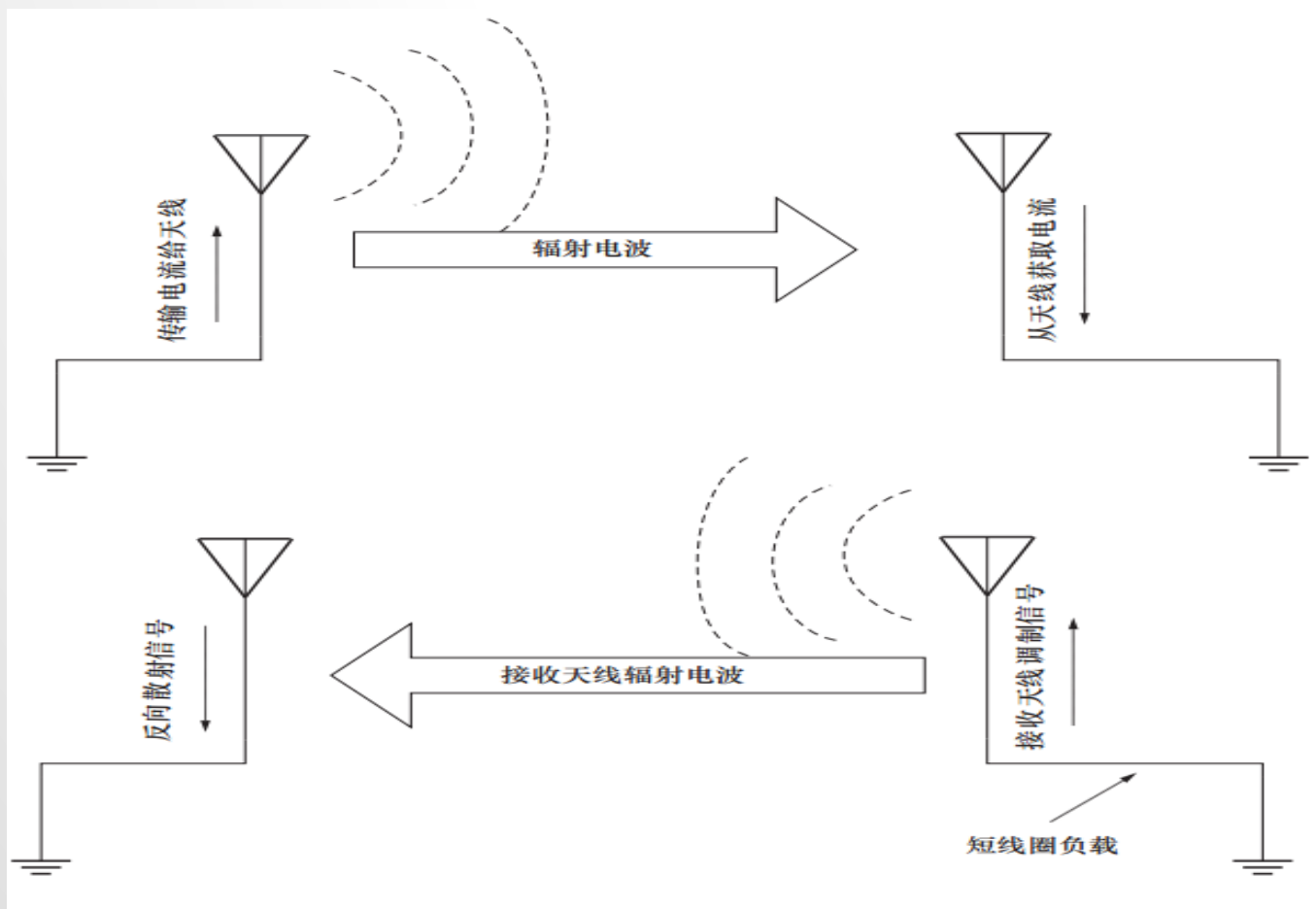


3.4 反向散射机制与标签编码



任何物体在接受到某个电磁波之后会同样传输这样一串电磁波。

接受器调制后辐射的电磁波能返回到传输器的天线中，并产生能被识别的信号，叫做**反向散射**信号。

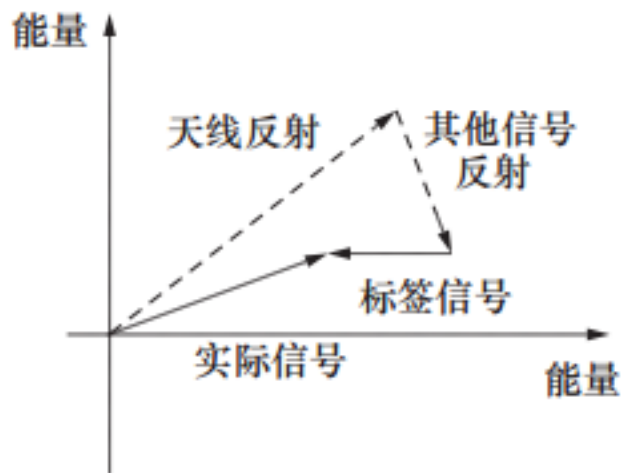


3.4 反向散射机制与标签编码

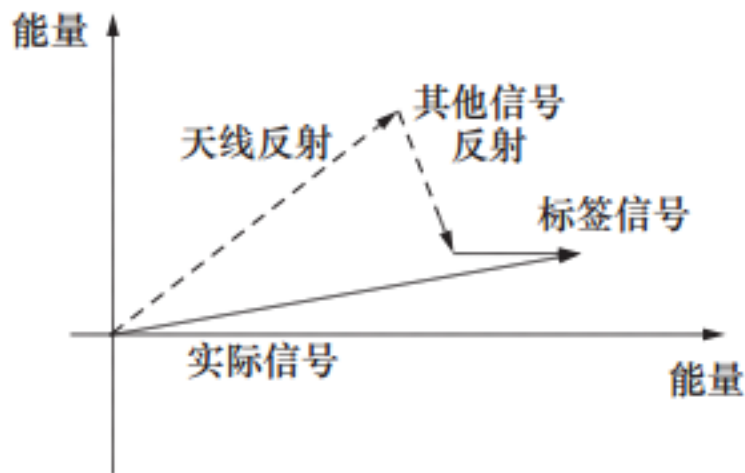


接收器在某一时刻接受到的反射信号向量是空间中各种信号的**矢量叠加**

如右图所示，叠加导致了**不确定性**，**如果想利用反向散射机制，就必须设计某种编码机制使得接收器能够根据这些变化识别信号，而不关心信号的相位或振幅。**



(a) 反射信号和标签信号叠加后导致实际信号小于天线信号



(b) 反射信号和标签信号叠加后导致实际信号高于天线信号

3.4 反向散射机制与标签编码

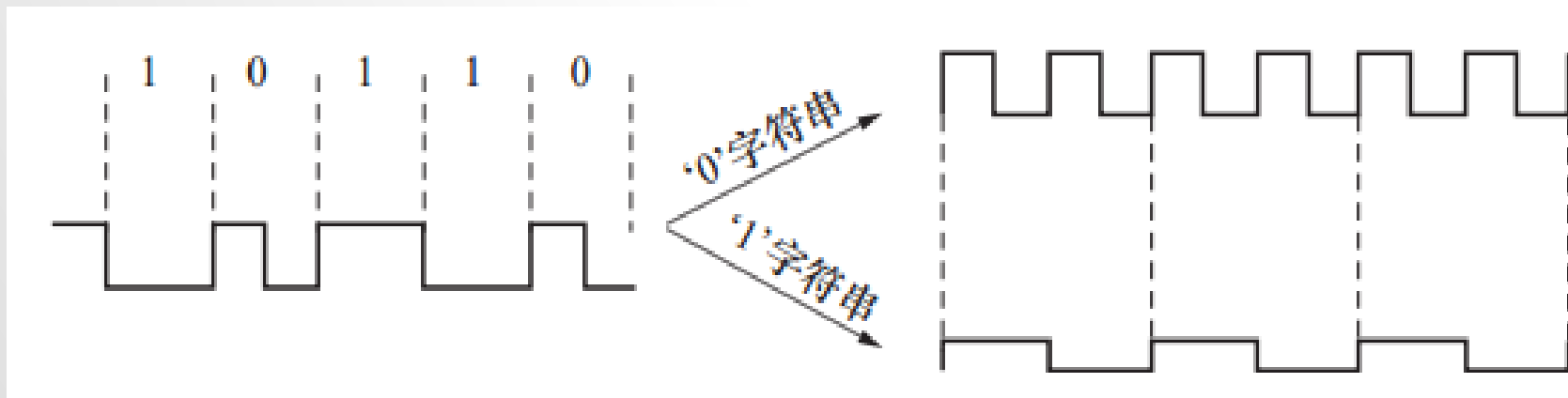


目前，标签编码方式都是基于特定的时间间隔内对标签变化进行计数，或基于标签状态变化频率。

属于频移键控(FSK)的变种。

“1”可能是1ms内标签状态的100次转变。

“0”可能是1ms内标签状态的50次转变。



3.5 链路预算

标签通过反向散射机制获得能量，大致过程如右上图所示。

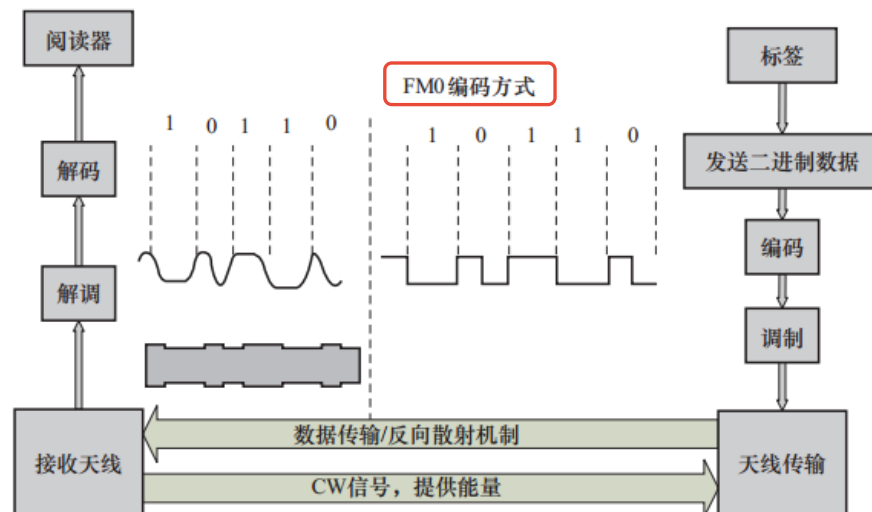
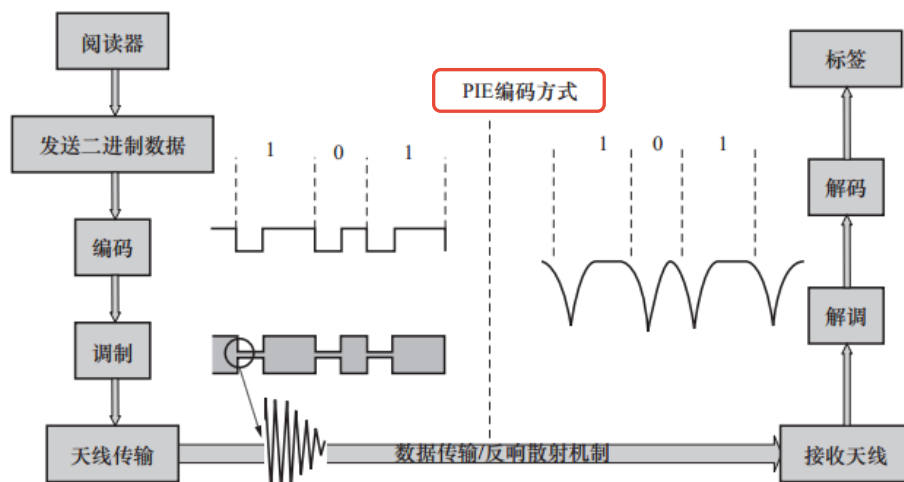
标签到阅读器回路的过程按照右下图所示。

需要对这些过程中的能量传递以及损耗过程进行具体分析。

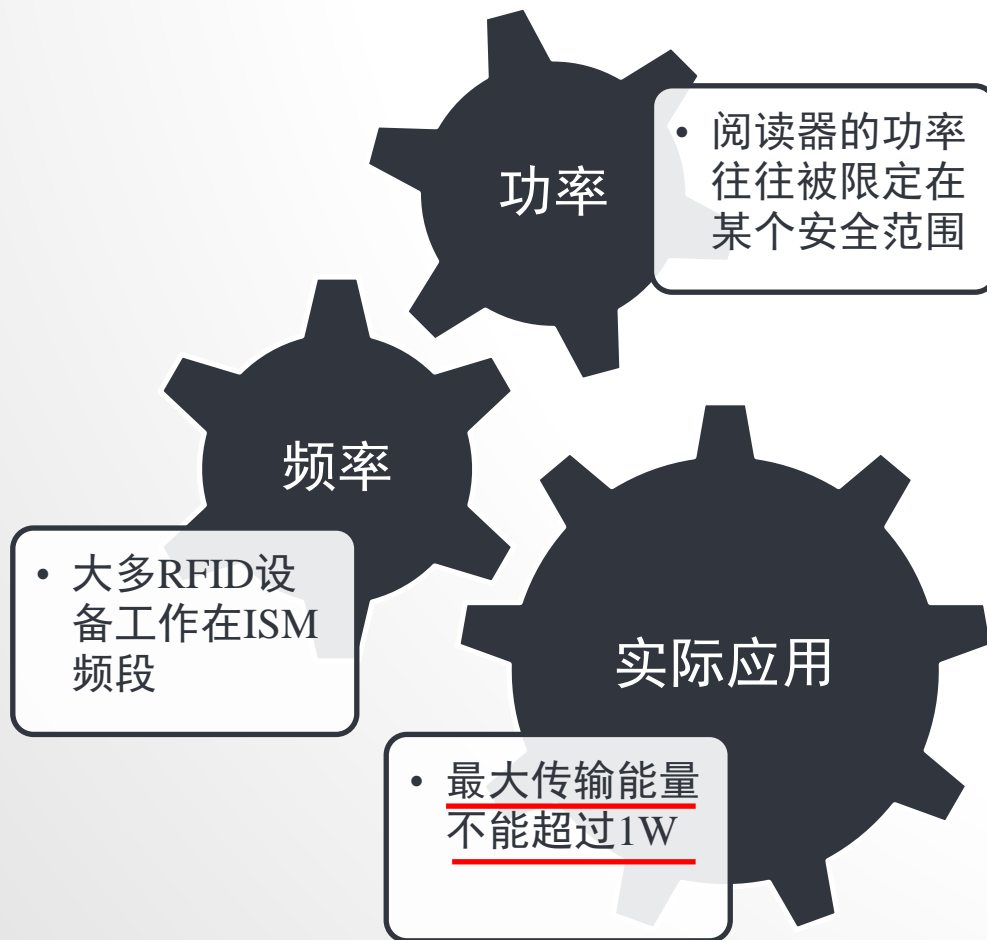
阅读器**传输**能量

路径**损耗**

标签**激活**能量



3.5.1 阅读器传输能量



3.5.2 路径损耗

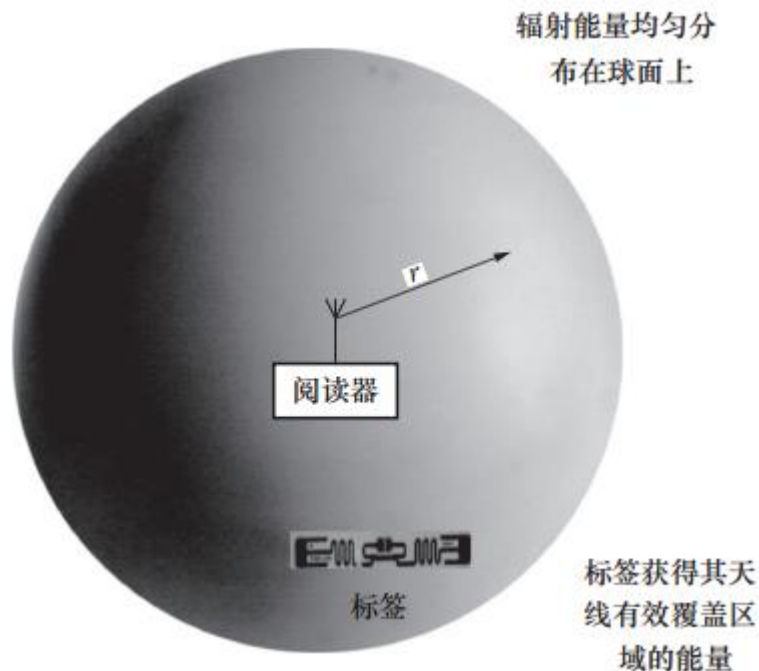


路径损耗：指在传输过程中，**传输器实际发送的能量**和**接收器实际接受到的能量**之间的**差异**。

假设天线传输是**各向同性**，即天线向各个方向均匀辐射能量。如右图所示。

标签实际接受到的能量，和区域内穿过标签的天线能量密度成正比。

这个区域被称为**标签天线的有效孔径** (Effective Aperture) A_c ：实际通过标签天线的电磁波面积。



3.5.2 路径损耗



对有效孔径是 A_e 的天线而言，接受能量密度为 ρ 的平面波时，接受能量为：

$$\underline{P_t = \rho A_e}$$

在各向同性天线的实例中，距离 r 处的能量密度是传输能量 P_{TX} 和球面的比值。

在标签处接受到的能量 P_{RX} 为：

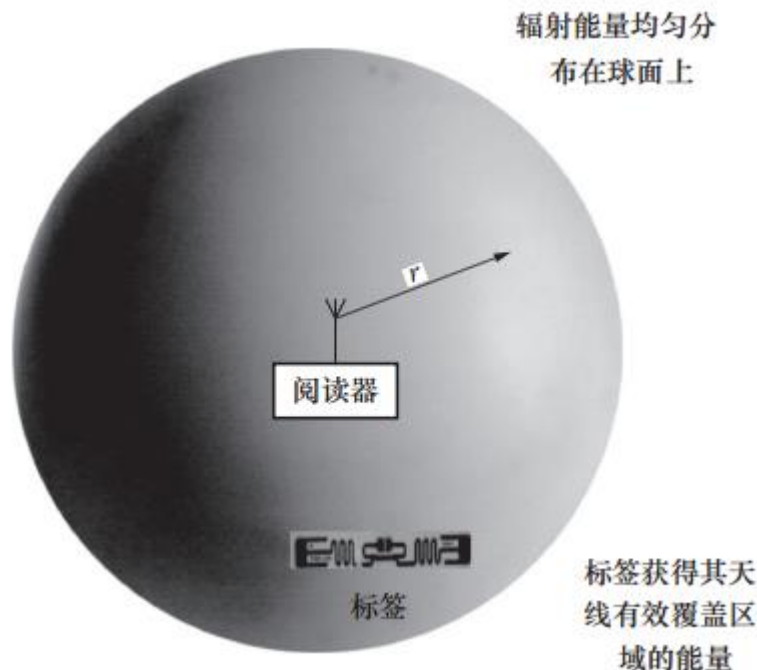
$$P_{RX} = P_{TX} \frac{A_e}{4\pi r^2}$$

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} \approx 86\text{cm}^2$$

λ 为915MHz信号对应的波长。

例如，在距离1m的位置，球面面积为 12.6m^2 ，当传输1W的时候，标签实际接收到的能量为 $7 \times 10^{-4} = 0.7\text{mw}$ (-1.6dBm)。

1W是30dBm，路径损耗为32dB。



3.5.3 标签激活能量

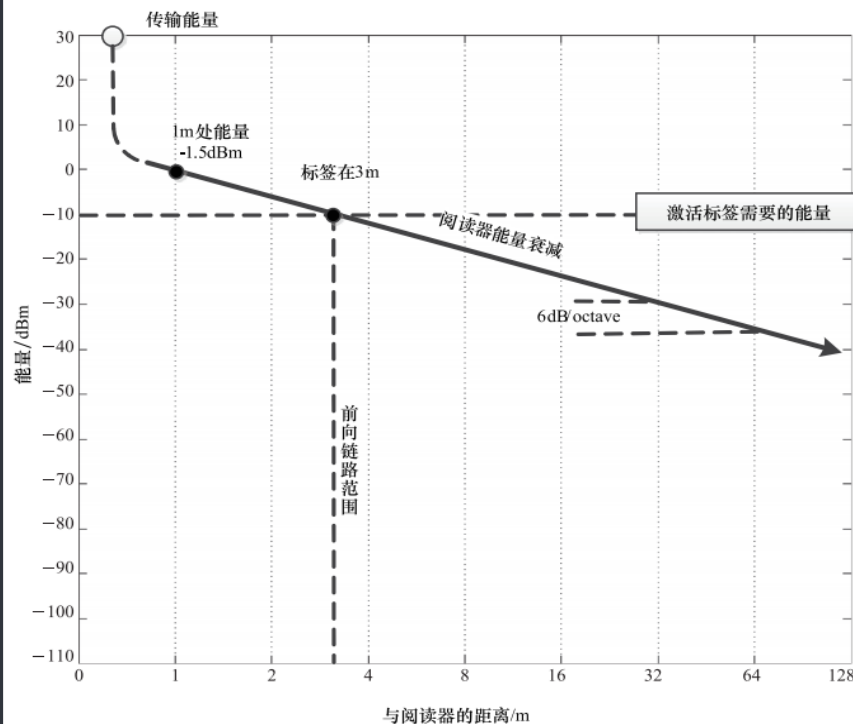


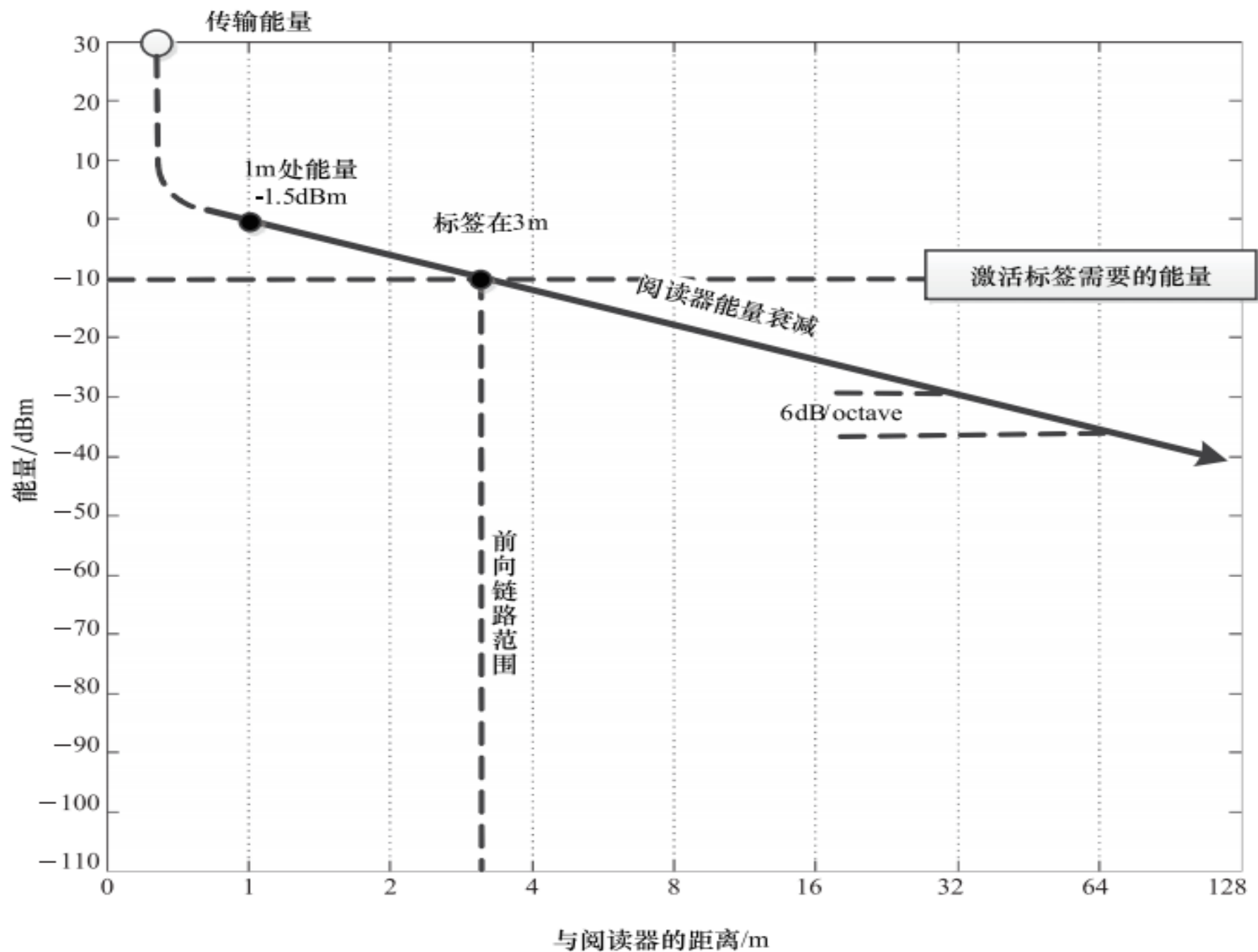
在标签读取阶段，标签需要 $10\sim 30\mu\text{W}$ 的能量来激活电路。

而目前能量利用率只有30%，所以，标签要获取 $30\sim 100\mu\text{W}$ 。由于阅读器提供的最大能量是 1W (30dBm)，芯片这里设置的阈值为 $100\mu\text{W}$ (-10dBm)，所以路径损耗的最大值为40dB。

按照前面的公式计算，采用全向天线，915MHz的系统所能支持的传输距离不到3m。

右图绘制了一条起点在(1m, -1.5dBm)斜率是-20dB/10m的直线来表示前向链路的衰减模式。





3.5.3 标签激活能量

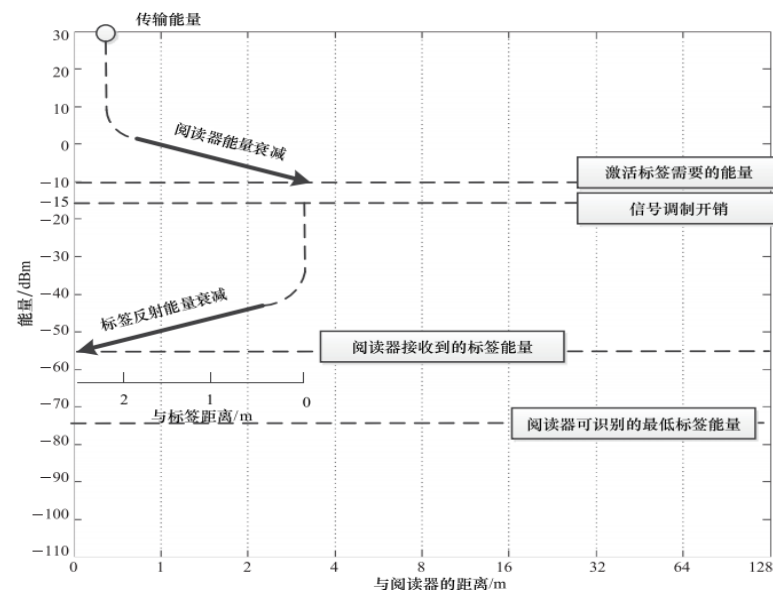


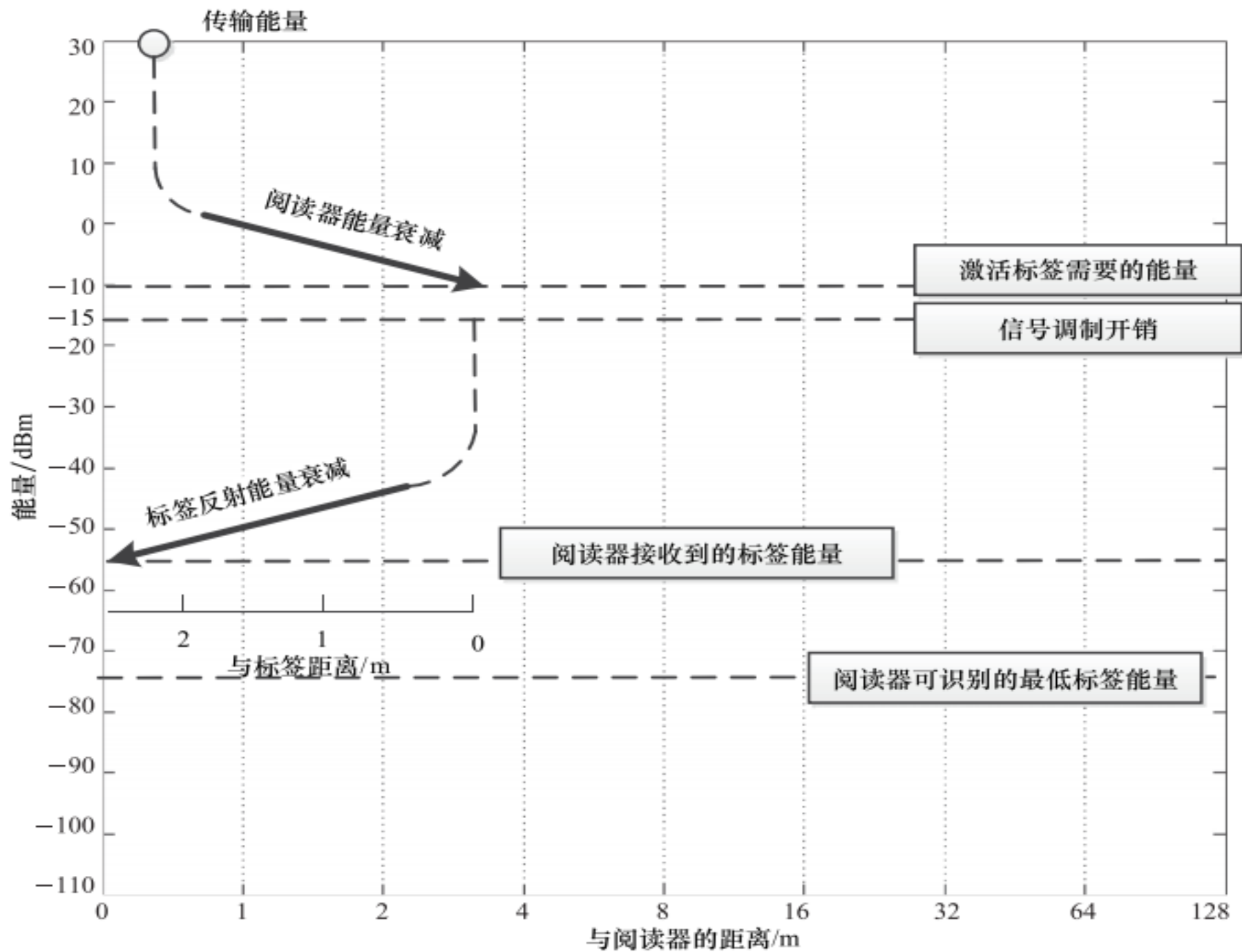
由于阅读器识别所需能量对不同标签表现不同，假设较为合理的阈值-75dBm。可以根据前向链路能耗图绘制反向链路的能量损耗图。

如右图所示，为前向和反向链路能量消耗。

从反射链路接受到的能量与距离四次方成反比：

$$P_{RX,back} \propto \frac{1}{r^4}$$





3.6 天线增益与极化对传输范围的影响



天线增益：在输入功率相等的条件下，实际天线与理想的辐射单元在空间同一点处所产生的信号的功率密度之比。它定量地描述一个天线把输入功率集中辐射的程度。

极化：指事物在一定条件下发生两极分化，使其性质相对于原来状态有所偏离的现象。

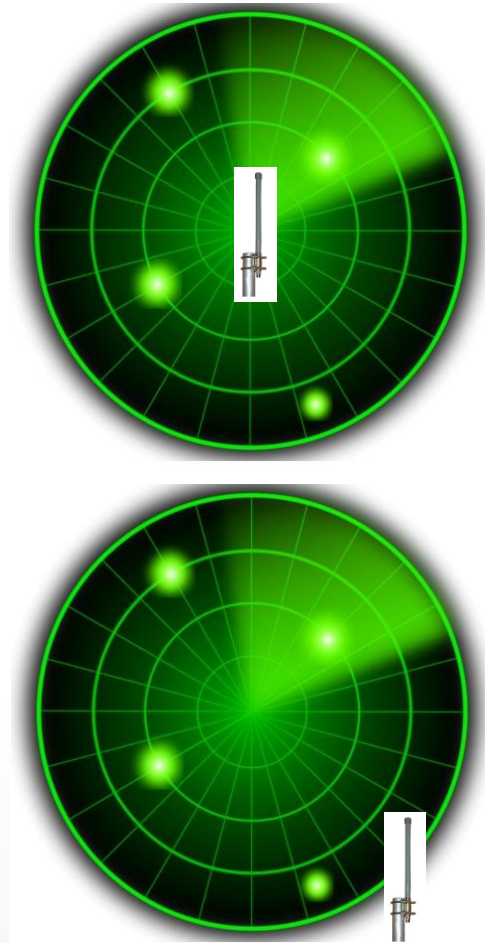


3.6.1 天线增益的影响



对于输出为1W的RFID阅读器，在全向天线的作用下只能传输2-3m的距离，在标签分布在阅读器四周的应用中比较有利。

现实场景中，阅读器会被安排在某个区域的边缘，而标签则被大量放置在该区域中心附近，并且标签构成的区域只在阅读器能够辐射到的某个角度区域内。



3.6.1 天线增益的影响

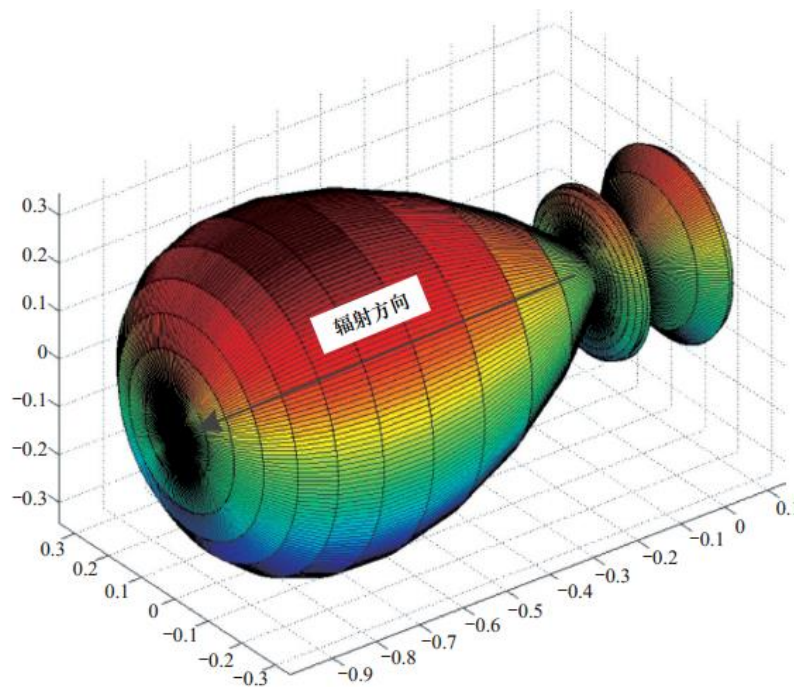


将能量集中于一处进行辐射的天线，叫做**定向天线**。

对于RFID应用场景，定向天线充分地利用这些传输能量，使得能量利用率最大化，而减少不必要区域的扫描能量浪费。

右图为定向天线的**辐射模型**。

对于相对于天线中心方向的任意角度 d ，曲线边缘代表着天线在此方向上辐射的能量密度。



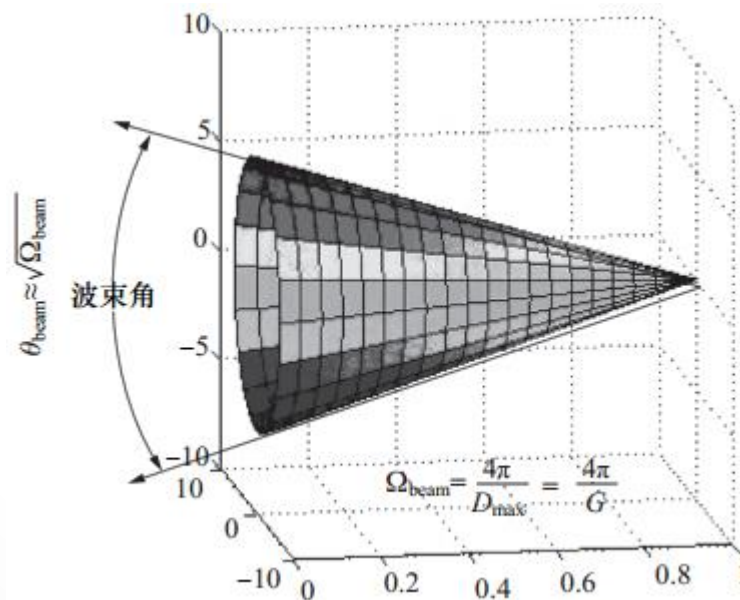
3.6.1 天线增益的影响



某个方向 d 上的辐射强度和平均到各个方向上的辐射强度的比例称为该方向上天线的**定向增益**。

该方向上的辐射效率也就是该天线的**功率增益**，也叫做**放大系数 G** (power gain)

对于定向天线而言，如需更高的功率增益，信号辐射的范围也就相对越窄，如右图所示。



3.6.1 天线增益的影响

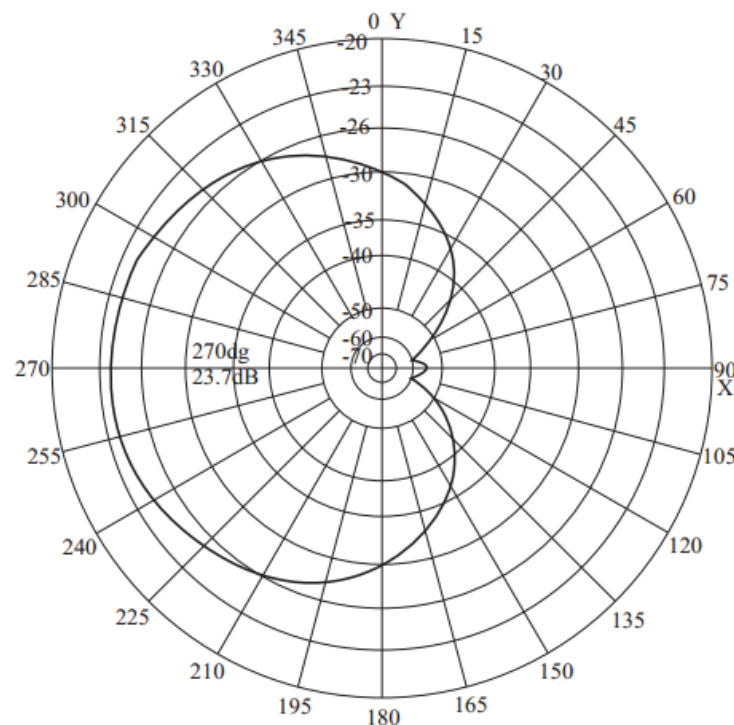


右图是商用RFID阅读器的定向天线极坐标辐射图。

其中的曲线是以对数模式描述各个方向的能量增益大小。

3dB对应的波束宽度，图中所示大约为 72° ，即1.25弧度，所以对应的光束立体角为 $(1.25)^2=1.6$ ，天线的增益大约为

$$G \approx 4\pi/1.6 \approx 8 \sim 9dB$$



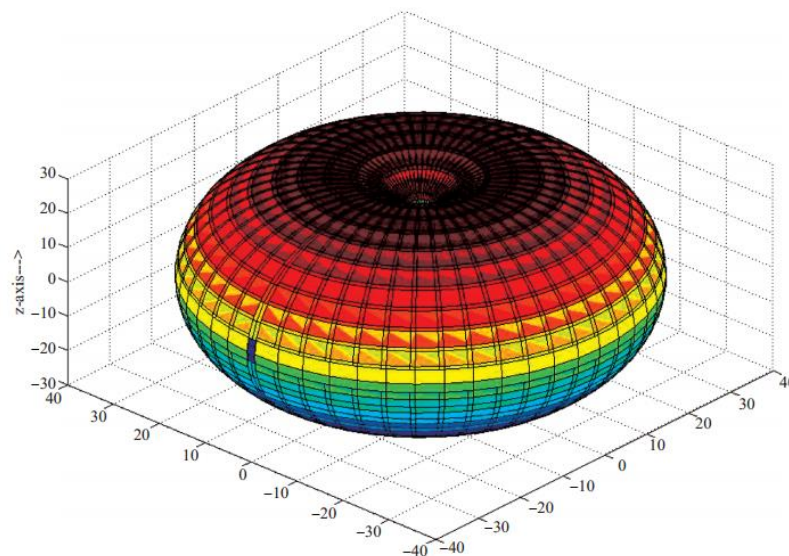
3.6.1 天线增益的影响



并非所有的天线都能够拥有很好的方向性，其中一种方向性不特别显著的天线就是**偶极天线**。

偶极天线并不向轴线辐射信号，而是均匀地向和轴线垂直的各个方向辐射。如右图所示。

相对偶极天线的增益比相对全向天线的增益要小2.2dB



3.6.1 天线增益的影响



通过天线的增益和传输能量，可以计算出利用全向天线，来达到定向天线所指向方向的最大增益效果时所需要的输入能量，这个能量称为**有效全向辐射功率（EIRP）**。

EIRP常被或明确或含蓄地用来规定无线操作上的能量限制。

例如FCC规定在美国地区，某个无线传输器可以传输1W能量的信号，同时可以使用6dBi的天线；天线增益增加1dB，传输能量就需要减小1dB。实际上，FCC是**规定EIRP不超过36dBm**（30dBm+6dBi）。

$$EIRP = \underbrace{P_{TX}(dBm)}_{\text{传输功率}} + \underbrace{G_{TX}(dBi)}_{\text{天线增益}}$$

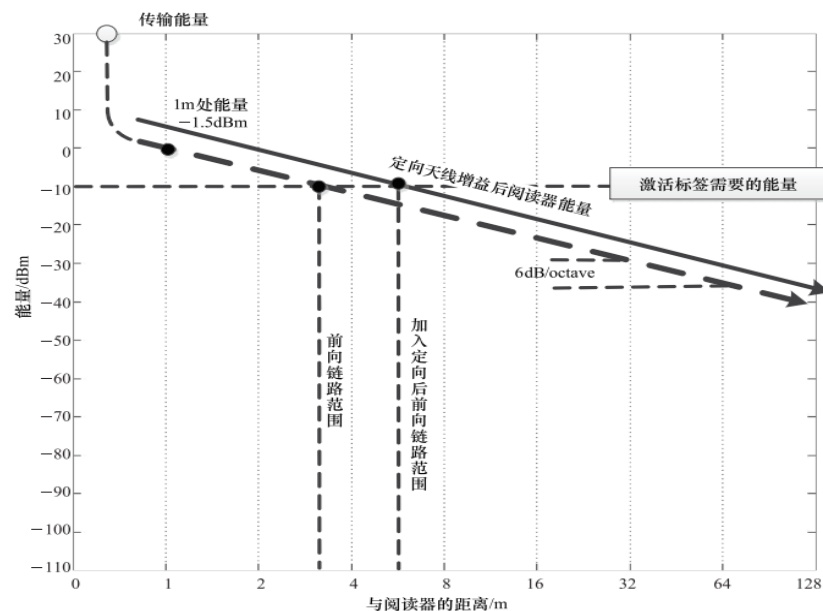
3.6.1 天线增益的影响

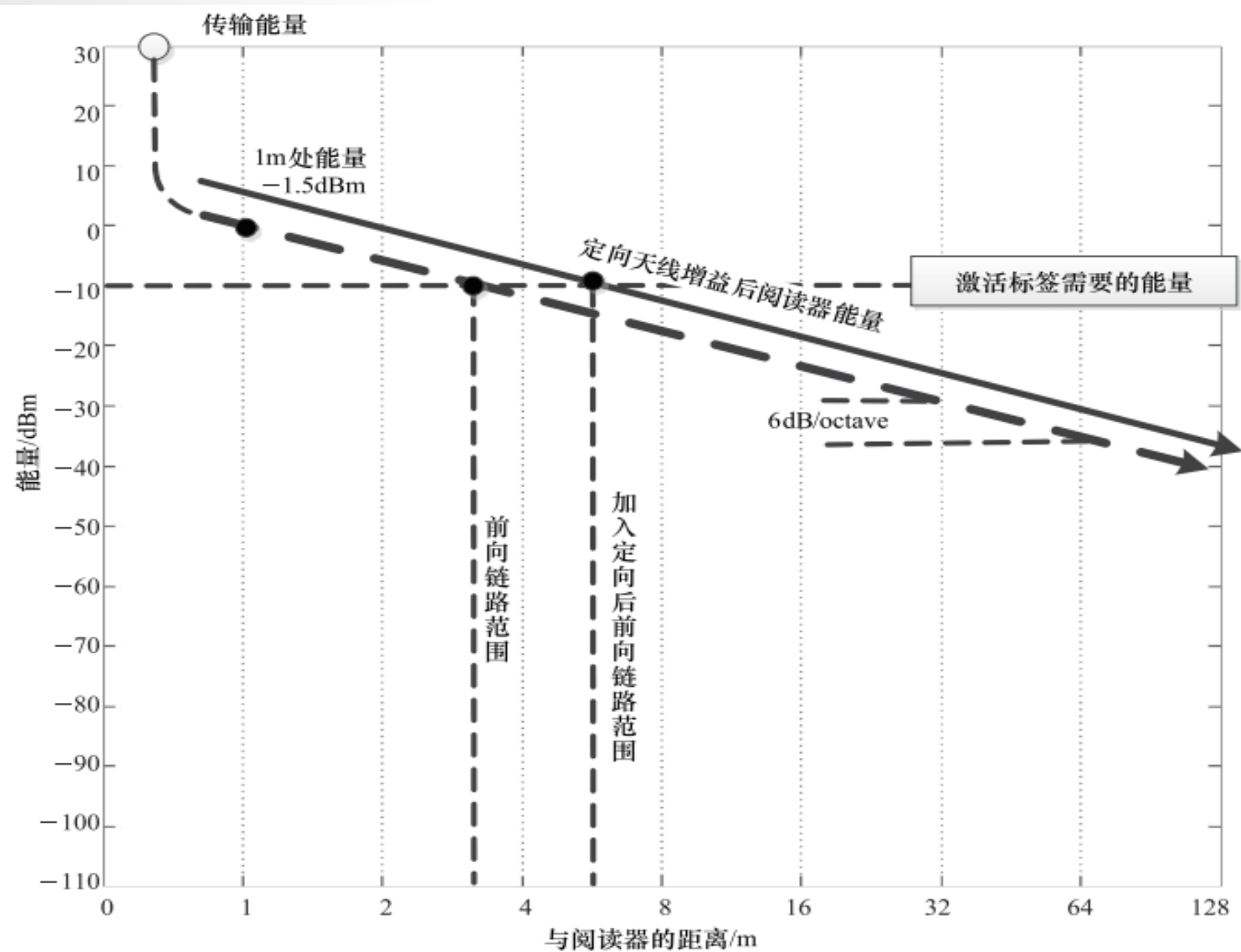


右图为初始能量1W的传输信号，使标签位于定向天线增益最大方向上时，6dBi天线增益的效果图。

前向链路的传输距离从3m增加到6m。
能量损耗是伴随距离平方速度下降。

反向链路的效果？





3.6.1 天线增益的影响



有效孔径： $A_e = G(\frac{\lambda^2}{4\pi})$ G表示天线增益

收发能量与距离关系：

$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} \frac{A_{e,RX}}{4\pi r^2} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \frac{\lambda^2/4\pi}{4\pi r^2} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} (\frac{\lambda}{4\pi r})^2$$

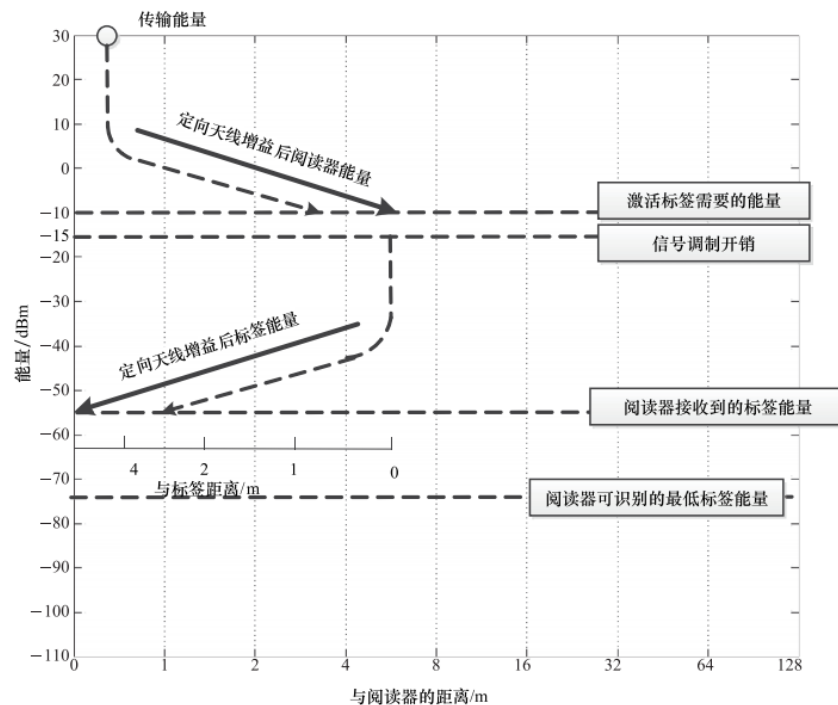
Friis方程式

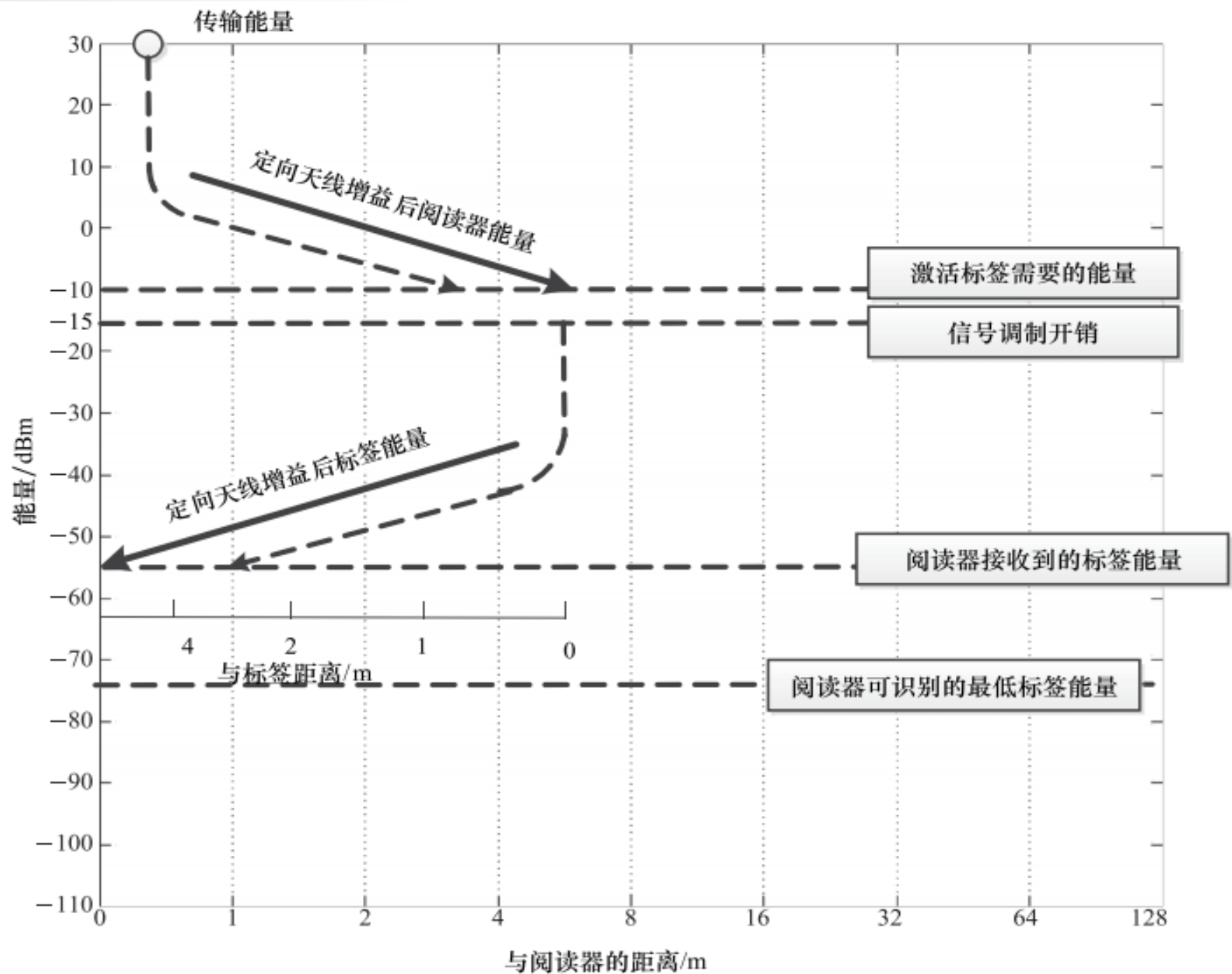
前向链路与反向链路能量开销：

$$P_{TX,tag} = P_{TX,reader} G_{reader} G_{tag} (\frac{\lambda}{4\pi r})^2 T_b$$

$$P_{RX,reader} = P_{TX,tag} G_{tag} G_{reader} (\frac{\lambda}{4\pi r})^2$$

$$P_{RX,reader} = P_{TX,reader} T_b G_{reader}^2 G_{tag}^2 (\frac{\lambda}{4\pi r})^4$$





3.6.1 天线增益的影响

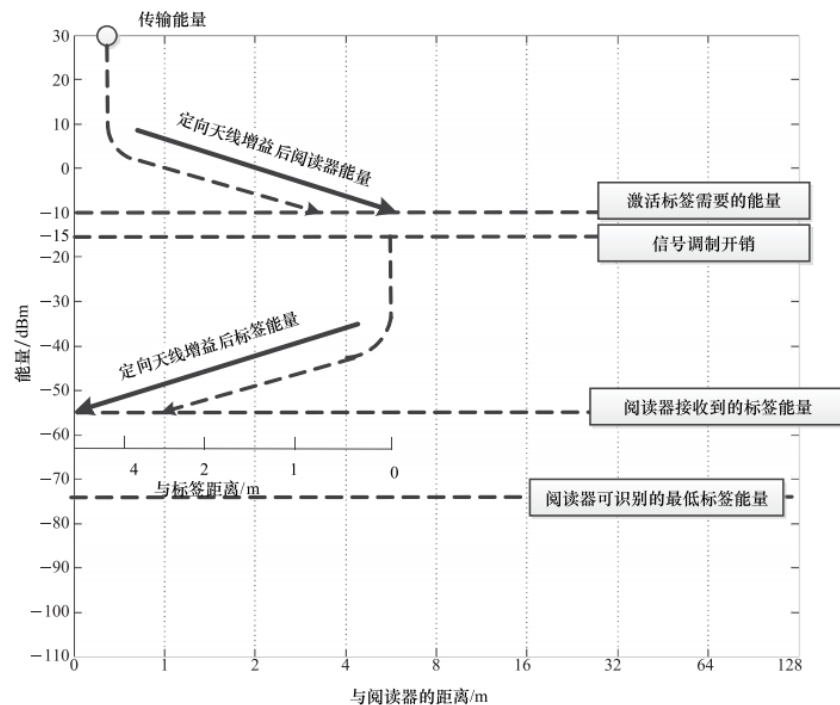


定义标签所需的最小能量 $P_{min,tag}$
则前向链路传输范围：

$$R_{forward} = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right) \sqrt{\frac{P_{TX} G_{reader} G_{tag}}{P_{min,tag}}}$$

定义阅读器端解调信号所需的最小信号
能量 $P_{min,reader}$
则反向链路传输范围：

$$R_{reverse} = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^4 \sqrt{\frac{P_{TX,reader} T_b G_{reader}^2 G_{tag}^2}{P_{min,reader}}}$$



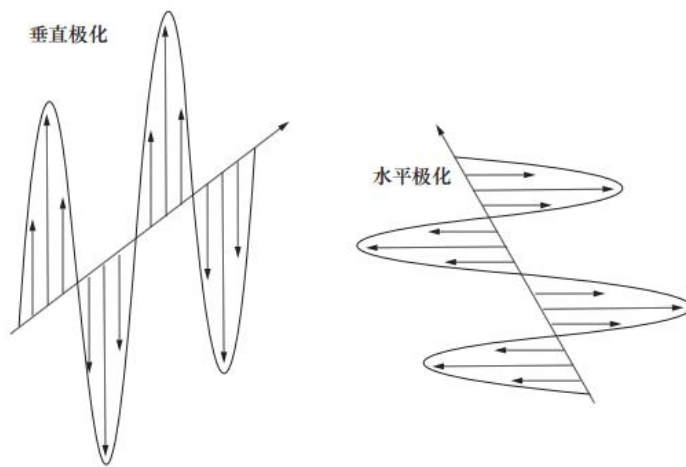
3.6.2 线性极化与圆极化



图中电磁矢量表示电磁场的方向
电场和磁场方向相互垂直，而场的方向
永远是和其传播方向垂直的，像这样**波**
的震动方向和传播方向垂直的波被称为
横波。

场的方向决定其极化方向。

极化方向始终固定的极化方式也被称为
线性极化。



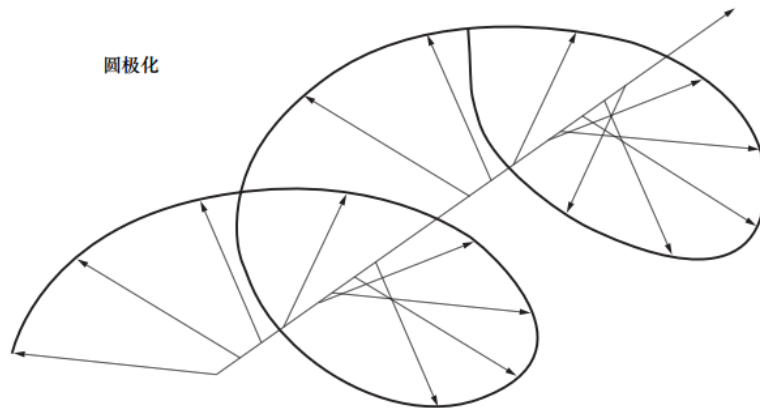
3.6.2 线性极化与圆极化



电磁场的方向可以随时间发生变化

当电磁场方向随时间绕传播方向的轴旋转而不改变其场强大小，获得的就是类似线性极化的圆极化辐射。

通过简单的矢量叠加过程，我们可以把纯圆极化转化为线性极化的叠加



3.6.2 线性极化与圆极化



圆极化的电磁波作用于线性极化的天线时，类似之前的分解过程，**只有和导线同向的电场分量能产生电势，而垂直的分量将没有效果。**

双偶极子：主要是通过**同时安置两个正交的天线在标签上来达到吸收不同方向能量的目的。**

对于线性极化，我们只需要乘以某个三角正弦变量即可表示其分量，这里**用极化方向和接收天线方向夹角**表示，如右公式所示。

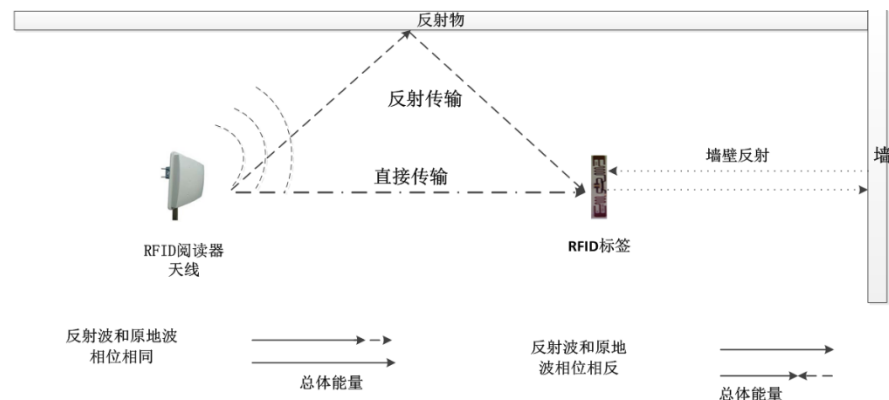
$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \cos^2(\theta_{pol}) \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$$

3.7 真实环境下的信号传输



以上都是在理想环境下进行的相关计算，实际环境中总是充满各种噪声和干扰。

阅读器自身信号的**散射**和**折射**后形成的干扰信号不是简单的能量叠加，而是每个点电势的累加，结果不可预知，即：**多径效应**。



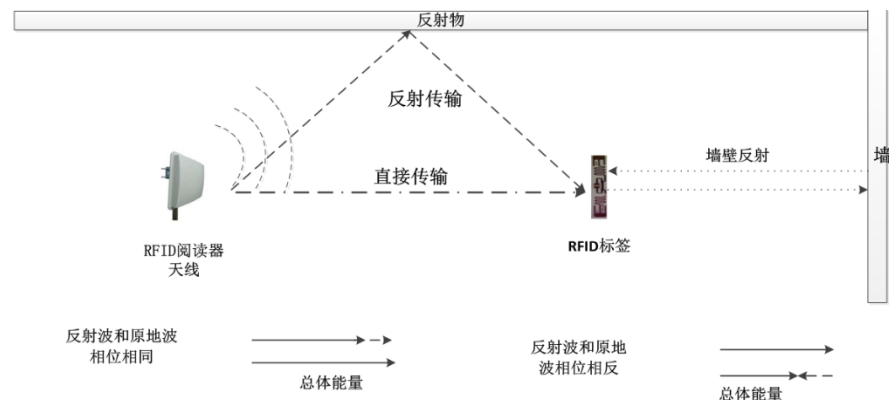
3.7 真实环境下的信号传输



一束阅读器的电磁波和其从地板以及墙壁返回的两束折射波叠加，若折射波拥有原电磁波能量的1/10，则我们获得的叠加电势将是：

$$V_{\text{total}}\cos(\omega t)=v_{\text{dir}}\cos(\omega t)+v_{r1}\cos(\omega t+\delta_1)+v_{r2}\cos(\omega t+\delta_2)$$

其中 δ 表示折射波与原电磁波之间的相位差，而 v 表示折射波振幅和原电磁波振幅的比值。相位差取决于电磁波传输距离的长度，长度增加波长的1/4，相位改变 90° 。



3.7 真实环境下的信号传输

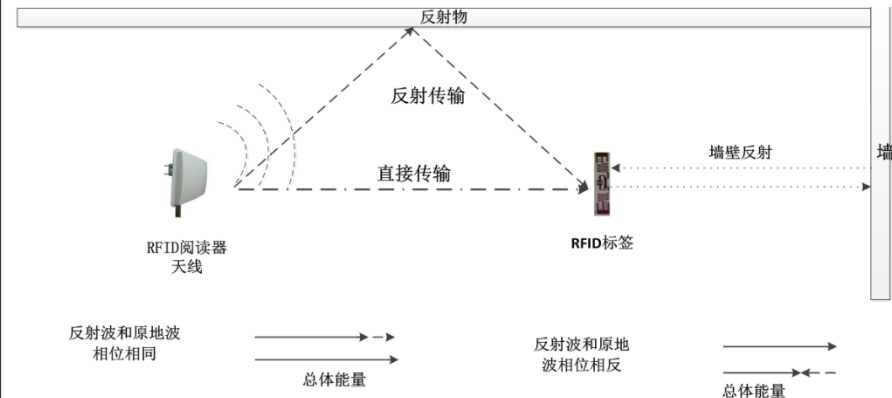


考虑最坏情况，当相位差为 0° 时可以得出叠加电势：

$$V_{\text{total}} = v_{\text{dir}} + \frac{v_{\text{dir}}}{3.2} + \frac{v_{\text{dir}}}{3.2} \approx \left(1 + \frac{2}{3.2}\right) v_{\text{dir}} \approx 1.63 v_{\text{dir}}$$
$$\frac{P_{\text{total}}}{P_{\text{dir}}} = 1.63^2 \approx 2.7(4.2\text{dB})$$

当相位差为 180° 时可以得出叠加电势：

$$V_{\text{total}} = v_{\text{dir}} - \frac{v_{\text{dir}}}{3.2} - \frac{v_{\text{dir}}}{3.2} \approx \left(1 - \frac{2}{3.2}\right) v_{\text{dir}} \approx 0.375 v_{\text{dir}}$$
$$\frac{P_{\text{total}}}{P_{\text{dir}}} = 0.375^2 \approx 0.14(-8.5\text{dB})$$



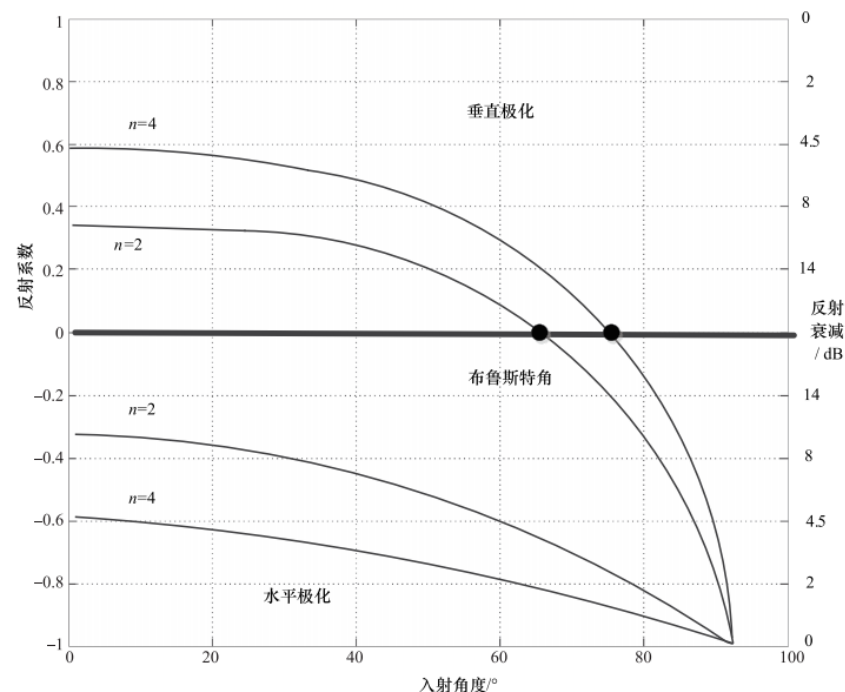
3.7 真实环境下的信号传输



在RFID系统中，地面的反射干扰是十分严重的，混凝土折射率高达2.5。

影响识别效率的还包括入射角度和极化方式。

垂直极化的波在辐射到水平地面上在某个称为**布鲁斯特角**上可以达到没有反射的效果，如右图所示。

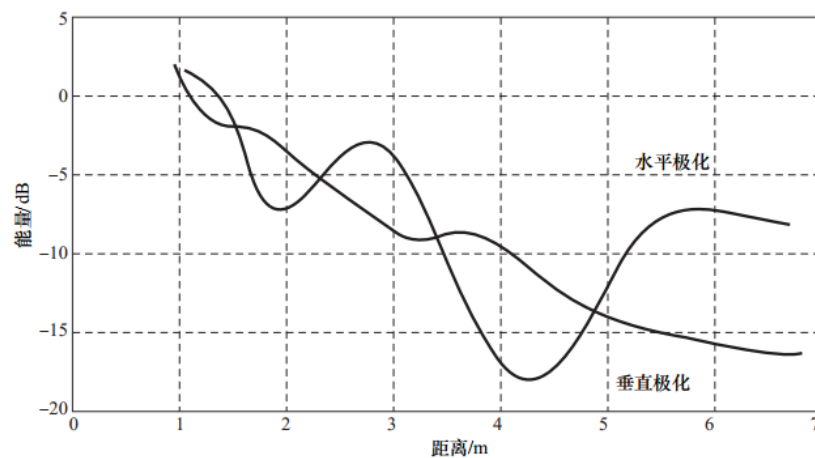


3.7 真实环境下的信号传输



垂直极化的信号能量衰减比较规律，而水平极化的信号能量则会更多地受到多径效应的影响，如右图所示。

线性极化的阅读器在使用垂直极化天线时，能够获得较好的阅读效果；水平极化的天线将可以识别更远的标签



3.8 RFID无线通信原理小结



针对不同应用环境的RFID系统，首先需要考虑RFID**载波频率**的选择。避免冲突是RFID系统正常工作的基础；超高频信号适合长距离识别，而低频信号适合短距离应用。



对于前向链路和反向链路的信号**调制编码**情况也需要慎重选择。被动和半主动标签，编码后需仍能提供稳定能量；在较复杂的无线环境中，抗干扰能力要强。



链路预算是关系到RFID系统适用范围的重要参数。**最大传输功率，信号衰减和路径损耗，标签的激活能量等因素都需要考虑。**远距离传输，考虑到链路预算的距离限制；近距离通信，降低传输功率来降低通信距离。

3.8 RFID无线通信原理小结



为了适应更加广泛的应用需求，**天线**的选择起到重要的作用。相比于全向天线，定向天线虽然减小了覆盖，但是提供更远的通信距离，从而扩大应用的适用范围；而天线的极化使得标签可以避免遭遇标签天线极化方向与电磁波垂直而导致无法识别信号的情况，因此**圆极化大大增加了RFID系统的适用性**。



RFID系统是**运行在实际环境中的**，其**传输干扰也比理论分析复杂许多**。如现实的噪音、障碍物阻挡、信号吸收、信号散射、多径效应等等。噪音阻碍信号的识别与传输，信号吸收影响RFID系统的传输距离，而信号散射使得RFID信号识别不稳定，某些原本不应该覆盖的区域可能会被误读取，多径效应则会造成信号强度的不稳定变化，造成标签识别范围的不稳定