

Радио и антенны

Конспект

Антенны FPV-дрона

Короткая версия перед экзаменом: Антенны: экзаменационная шпаргалка.

Главное за минуту

- Антенна не «усиливает передатчик». Она превращает ВЧ-ток в электромагнитную волну и распределяет энергию по направлениям.
- Для рабочей пары должны совпадать **частотный диапазон, поляризация и тип разъёма**. Импеданс тракта обычно 50 Ω .
- На подвижном дроне обычно ставят всенаправленную антенну. Направленная антенна полезнее на пульте, очках или наземной станции.
- Большее усиление dBi означает более узкую диаграмму или более «плоский бублик», а не бесплатную мощность во все стороны.
- SWR/KCB показывает согласование, но не доказывает хороший КПД, усиление или дальность.
- Для круговой поляризации нужна одинаковая сторона: RHCP $\leftrightarrow$ RHCP либо LHCP $\leftrightarrow$ LHCP.
- Карбон, аккумулятор, силовые провода, защитный пластик и повреждённый коаксиал могут ухудшить или расстроить антенну.
- Нельзя включать VTX без исправной антенны и нельзя подключать работающий VTX к LiteVNA.

Иллюстрация источника: Всенаправленная и направленная диаграммы в FPV.
(Изображение не включено в текстовую базу.)

Источники и статус сведений

- **Материал курса:** school/Різнovidи та характеристики антен Заняття 1.pptx и school/Презентація antenn.pptx. Из них взяты перечень параметров, примеры типов антенн, каналов, разъёмов, монтажа и FPV-применения.
- **Проверено отдельно:** смысл gain/directivity, поляризационные потери, связь SWR с отражённой мощностью, варианты ExpressLRS, ресурс разъёмов и актуальные характеристики нескольких приведённых в слайдах антенн.
- **Важно:** численные параметры конкретных Moxon, patch, helical и других моделей из презентаций — примеры, а не постоянные свойства типа антенны.

Как антенна работает

Передающая антенна получает от передатчика высокочастотный ток и создаёт переменное электрическое и магнитное поле. Часть энергии отделяется от антенны и распространяется как радиоволна. Приёмная антенна делает обратное: поле создаёт в ней слабое ВЧ-напряжение, которое поступает в приёмник.

Для обычной пассивной антенны передача и приём взаимны: её рабочая полоса, поляризация и диаграмма в обоих режимах одинаковы. Различается только направление преобразования энергии.

В FPV одновременно работают четыре антенные позиции:

1. передатчик управления на пульте;

2. приёмник управления на дроне;
3. видеопередатчик VTX на дроне;
4. видеоприёмник в очках или наземной станции.

Частота и размер

$\lambda = c/f$: чем выше частота, тем короче волна и тем меньше резонансный элемент.

Частота	Длина волны λ в воздухе	$\lambda/4$
868 MHz	345 mm	86 mm
915 MHz	328 mm	82 mm
1.3 GHz	231 mm	58 mm
2.4 GHz	125 mm	31 mm
5.8 GHz	51.7 mm	12.9 mm

$\lambda/4$ — ориентир, а не готовая длина любой антенны. Реальный размер зависит от конструкции, изоляции, подложки, коэффициента укорочения, согласующей цепи и окружающих деталей.

Практические диапазоны из курса:

- управление: варианты около 868/915 MHz и 2.4 GHz;
- аналоговое видео: часто 5.8 GHz, также в материалах есть примеры около 1.2/1.3 GHz и 3.2–3.7 GHz;
- Raceband 5.8 GHz: 5658, 5695, 5732, 5769, 5806, 5843, 5880, 5917 MHz.

Название диапазона недостаточно: антенна должна покрывать именно каналы конкретного передатчика. Региональный профиль ExpressLRS (EU 868, FCC 915, 2.4 GHz) и частотную таблицу VTX выбирают по оборудованию и действующим правилам.

Диаграмма, усиление и ширина луча

- **Всенаправленная (omni)** даёт покрытие на 360° только по азимуту. Пространственная диаграмма похожа на бублик: вдоль оси антенны сверху и снизу есть провалы.
- **Направленная** концентрирует энергию в секторе. Она даёт выигрыш по дальности, но требует наведения.
- Gain, dBi — выигрыш в направлении максимума относительно изотропной антенны. Полный gain учитывает и направленность, и потери антенны.
- HPBW, или ширина луча @ -3 dB, — угол между точками, где плотность мощности упала вдвое относительно максимума.

Иллюстрация источника: Как усиление связано с диаграммой и HPBW. (Изображение не включено в текстовую базу.)

Быстрые соотношения:

Изменение	Мощность в выбранном направлении	Идеальная дальность в свободном пространстве*
+3 dB	×2	×1.41
+6 dB	×4	×2
+10 dB	×10	×3.16

* При неизменных частоте, чувствительности, потерях, наведении и условиях трассы. Помехи, препятствия и зона Френеля обычно уменьшают практический результат.

Примеры из слайдов: Moxon 4.6 dBi / 145°, patch примерно 9–11 dBi / 55–90°, patch array и helical примерно 14–15.2 dBi / 25–30°, параболическая антенна 30 dBi / 3°. Это характеристики показанных моделей: у другой конструкции цифры будут другими.

Поляризация

Поляризация описывает движение вектора электрического поля.

- **Линейная (LP):** поле колеблется в одной плоскости. Антенны желательно держать параллельно.
- **Круговая (CP):** поле вращается. Стороны обозначают RHCP и LHCP.
- Для FPV-видео круговая поляризация удобна при кренах/тангаже и помогает ослаблять часть отражённых сигналов.
- «Аналог = RHCP, цифра = LHCP» — не правило физики. Сторону выбирают по конкретной системе и второй антенне пары.

Идеальные поляризационные потери:

Пара	Потеря
линейные параллельно	0 dB
линейные под 45°	3 dB
линейные под 60°	6 dB
линейные под 90°	теоретический провал
линейная ↔ круговая	3 dB
RHCP ↔ LHCP	глубокий провал; величина зависит от качества антенн

В реальном полёте отражения и многолучёвость заполняют идеальные нули, но одновременно вызывают нестабильность сигнала.

Импеданс, резонанс и SWR

Обычный FPV-RF-тракт рассчитан на 50 Ω: выход передатчика, коаксиальный кабель, разъёмы и антенна должны быть согласованы.

Импеданс антенны комплексный: $Z = R + jX$.

- **Резонанс:** реактивная часть $X \approx 0$.
- **Согласование с 50 Ω:** импеданс близок к $50 + j0 \Omega$.

Резонанс сам по себе не гарантирует согласование: на резонансе активная часть может быть не 50 Ω.

SWR	Отражённая мощность	Оценка согласования
1.2	0.8%	очень хорошее
1.5	4%	хороший практический ориентир курса
2.0	11.1%	заметное рассогласование
3.0	25%	плохое

Иллюстрация исходника: Полоса антенны по границе SWR 1.5. (Изображение не включено в текстовую базу.)

Низкий SWR означает малое отражение на входе, но энергия может теряться в плохом кабеле или самой антенне. Поэтому «SWR 1.1» не доказывает хорошую дальность.

Какие антенны куда ставят

Тип	Диаграмма / поляризация	Типичное применение
монополь, диполь, Т-антенна	почти omni / линейная	RX управления на дроне, простые TX-антенны
Moxon	широкий сектор / линейная	пульт управления, когда нужен выигрыш без очень узкого луча
Yagi-Uda («волновой канал»)	направленная / линейная	наземный TX/RX, дальняя секторная связь
логопериодическая	направленная, широкополосная / линейная	измерения и наземная работа в широком диапазоне
cloverleaf, Pagoda, Lollipop/AXII	почти omni / круговая	VTX на дроне; omni-вход видеоприёмника
patch, crosshair	направленная / линейная или круговая	очки и наземная видеостанция
helical	направленная / круговая	дальний видеоприём; больше gain — уже сектор
параболическая, рупорная	очень направленная	стационарная, следящая или измерительная система

Практический комплект:

- управление на дроне — антенна RX строго своего диапазона, вынесенная из карбона;
- VTX на дроне — обычно лёгкая omni CP нужной частоты;
- один вход очков — omni CP той же стороны;
- diversity — omni CP для полёта вокруг себя плюс patch/helical CP той же стороны для дальнего сектора;
- направленную антенну на земле поворачивают лицевой стороной к дрону и учитывают ширину луча.

Разъёмы и коаксиал

Разъём	Что важно
SMA	резьбовой, прочный; подходит для очков, модулей и крупных VTX
RP-SMA	похож на SMA, но центральный контакт обратного пола; проверять и резьбу, и pin/socket
MMCX	компактный защёлкивающийся; обычно заметно долговечнее U.FL
U.FL / семейство I-PEX MHF	очень маленький и лёгкий; поднимать строго за корпус подходящим инструментом, не тянуть за кабель

В каталоге Hirose для стандартного U.FL указана проверка долговечности всего на 30 соединений; у MMCX Amphenol — не менее 500. Это не означает, что любой клон выдержит столько же.

Потери переходника или изгиба нельзя задавать одной универсальной цифрой. Они зависят от частоты, конкретного разъёма, кабеля, радиуса изгиба и качества сборки. На 5.8 GHz короткий тонкий коаксиал и лишние переходы уже существенны; измерять их лучше по S21.

Практика в FPV-дроне

Иллюстрация исходника: Правильный и плохой монтаж антенн на FPV-дроне.
(Изображение не включено в текстовую базу.)

Монтаж

1. Вынести **излучающую часть**, а не только кабель, за карбон, аккумулятор и силовую проводку.
2. Разгрузить разъём: удар и натяжение должен принимать крепёж, а не U.FL/MMCX на плате.
3. Не делать острых заломов коаксиала; соблюдать радиус изгиба конкретного кабеля.
4. Не давать антенне попасть в пропеллер, но и не прятать её между карбоновыми пластинами.
5. У diversity-разнесения расположить антенны так, чтобы их провалы и экранирование рамой не совпадали; следовать схеме производителя.
6. Не закрывать излучатель случайной термоусадкой/TPU/PLA без повторного измерения: диэлектрик может сдвинуть резонанс.
7. Перед подачей питания убедиться, что VTX-антенна реально подключена и разъём не повреждён.

Безопасная проверка

1. Снять пропеллеры, отключить LiPo и отсоединить антенну от VTX/RX.
2. Откалибровать LiteVNA в плоскости подключения антенны, уже с нужным переходником.
3. Измерить S11/SWR отдельно в свободном пространстве, не касаясь излучателя рукой.
4. Установить антенну на обесточенный дрон и повторить измерение в штатной компоновке.
5. Сравнить SWR на нижней, средней и верхней рабочей частоте, а не только минимум кривой.
6. Кабель и переходники проверять отдельно по S21 или сравнительным измерением.
7. Полностью убрать LiteVNA, восстановить соединение и только затем включать питание.
8. Выполнить штатный range test системы на малой мощности по инструкции производителя и смотреть одновременно RSSI и LQ.

Оптической видимости мало: для дальней связи важна свободная первая зона Френеля.

Иллюстрация источника: Прямая видимость и первая зона Френеля. (Изображение не включено в текстовую базу.)

Симптом → вероятная причина

Симптом	Что проверять первым
рядом работает, при развороте резко проваливается	осевой null, ориентация линейной антенны, экранирование карбоном
видео плохое сразу после замены антенны	частота, RHCP/LHCP, SMA/RP-SMA, неполное защёлкивание MMCX/U.FL
связь меняется при шевелении хвоста	надлом коаксиала, центрального проводника или разъёма
VTX сильно греется, дальность упала	отсутствующая/повреждённая антенна, плохой разъём, сильное рассогласование
после TPU/термоусадки минимум SWR сместился	влияние диэлектрика и близких деталей
SWR хороший, а дальность плохая	потери кабеля/антенны, неверная поляризация, помехи, диаграмма, закрытая зона Френеля
patch работает только в узком направлении	это нормальная цена высокого gain; проверить наведение и HPBW

Неточности и спорные места презентаций

- SWR назван мерой эффективности антенны. Точнее: это мера входного согласования; КПД и gain требуют других измерений.
- «+3 dBi удваивает мощность передатчика» — неверная формулировка. Передатчик выдаёт ту же мощность; примерно вдвое растёт плотность мощности в направлении максимума при прочих равных.
- «Резонанс означает согласование» — неполно. При $X = 0$ активная часть R всё ещё может отличаться от 50 Ω .
- «Всенаправленная излучает на 360°» верно только для горизонтального среза; сверху и снизу есть провалы.
- Связь только при прямой видимости — слишком жёсткое утверждение. Дифракция и отражения позволяют приём без LoS, но надёжная дальняя линия обычно требует LoS и свободной зоны Френеля.
- RHCP для аналога и LHCP для цифры — лишь распространённые комплектации отдельных систем, не общее правило.
- Фраза, что helical с 6+ витками увеличивает дальность «на порядки», преувеличена. Даже +10 dB даёт в идеальном свободном пространстве только около $\times 3.16$ по дальности.
- Числа потерь прямого/углового переходника и изгиба на 90° приведены как универсальные, хотя зависят от конкретной детали и частоты.
- В таблице 5.8 GHz строка Band A содержит дублированные 5865 MHz и пропускает 5765 MHz; таблицу VTX следует брать из прошивки/руководства конкретного устройства.
- На слайде Foxeer Lollipop V4 указана полоса 4.9–5.4 GHz, хотя сама модель обозначена производителем как 5.8G; это похоже на ошибку или смешение характеристик.
- Покрытие антенны защитным материалом действительно может изменить настройку, но фиксированные «до 2 dB» и обязательный сдвиг вниз нельзя считать универсальными.

Проверенные внешние источники

- [Keysight: измерение кабелей и антенн, Return Loss и VSWR](#)
- [NASA: gain, directivity и диаграмма направленности](#)
- [NIST: потери из-за ориентации, поляризации и многолучёвости](#)
- [ExpressLRS: выбор аппаратуры и размещение антенн](#)
- [ExpressLRS: региональные частотные профили](#)
- [Hirose: каталог U.FL](#)
- [Amphenol RF: характеристики MMCX](#)
- [Amphenol RF: RP-SMA](#)
- [Lumenier: AXII 2 5.8 GHz](#)
- [Foxeer: каталог 5.8 GHz Lollipop 4](#)

Быстрая самопроверка

1. Почему высокий dBi не означает усиление во все стороны?
2. Чем резонанс отличается от согласования с 50 Ω ?
3. Что потеряется при паре линейная $\leftrightarrow$ круговая?
4. Почему у omni бывают провалы прямо над антенной?
5. Что важнее проверить после установки антенны рядом с карбоном?

6. Почему хороший SWR ещё не гарантирует дальность?

Материалы для курса — 2026-09-07

Подготовлены разъёмы, измерения и словарь, волны, длина и усиление, Френель и многолучёвость, полные украинские переводы. Русская основная подача вычитана, украинская адаптация пересобрана без потери сцен и объяснений. KCB 1,5 обозначен учебным критерием; согласование отделено от эффективности, оценка дальности привязана к свободному пространству. Пакет и образец украинского стиля (исходный материал вне поставки: lectures/REVIEW_PACKAGE_ru.md).

dBm, dBi, dBd и dB: практическая памятка

Ниже — справочные радиотехнические сведения, не цитаты из материалов курса.

Иллюстрация источника: Разница между dBm, dBi и dBd. (Изображение не включено в текстовую базу.)

Что означает каждая единица

- dB — относительное изменение или отношение двух величин. Это не абсолютная мощность. В dB указывают потери кабеля, выигрыш/ослабление и запас радиолинии.
- dBm — абсолютная мощность относительно 1 mW: $0 \text{ dBm} = 1 \text{ mW}$.
- dBi — усиление антенны относительно идеального изотропного излучателя (*i* = isotropic).
- dBd — усиление антенны относительно полуволнового диполя (*d* = dipole).

Буква *i* задаёт точку отсчёта, а не обозначает саму направленность. Усиление (gain) в dBi учитывает направленность и потери в самой антенне. Если указан realized gain, дополнительно учитывается рассогласование на входе. Поэтому две антенны с похожей диаграммой могут иметь разный реальный gain.

Перевод усиления антенн:

$$\text{dBi} = \text{dBd} + 2,15 \text{ dB}$$

Следовательно, $0 \text{ dBd} = 2,15 \text{ dBi}$. Перед расчётом радиолинии все значения усиления удобно переводить в dBi.

Быстрые соотношения

- +3 dB — примерно в 2 раза больше мощности.
- -3 dB — примерно половина мощности.
- +6 dB — примерно в 4 раза больше мощности.
- +10 dB — в 10 раз больше мощности.
- -10 dB — в 10 раз меньше мощности.

Для мощности:

$$P[\text{mW}] = 10^{(P[\text{dBm}] / 10)}$$

$$P[\text{dBm}] = 10 \times \log_{10}(P[\text{mW}])$$

Полезные значения:

dBm	Мощность
0	1 mW
10	10 mW
20	100 mW
23	примерно 200 mW
26	примерно 400 mW
27	примерно 500 mW
29	примерно 800 mW
30	1 W
33	примерно 2 W
36	примерно 4 W

Почему удвоение дальности стоит 6 dB

В свободном пространстве плотность мощности уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния:

$$P_{RX} \propto 1 / D^2$$

При удвоении дистанции та же энергия распределяется по сфере в 4 раза большей площади, поэтому приёмник получает четверть мощности:

$$P_2/P_1 = (D_1/D_2)^2 = (1/2)^2 = 1/4$$

В децибелах это $10 \cdot \log_{10}(1/4) = -6,02$ dB. То же получается из формулы изменения потерь свободного пространства:

Иллюстрация источника: Почему удвоение дистанции даёт 6 dB потерь. (Изображение не включено в текстовую базу.)

$$\Delta L = 20 \cdot \log_{10}(D_2/D_1)$$

Отсюда идеальный множитель дальности для добавленного запаса G:

$$D_2/D_1 = 10^{(G/20)}$$

Дополнительный запас	Идеальный множитель дальности
3 dB	×1,41
6 dB	×2,00
10 dB	×3,16
12 dB	×3,98
20 dB	×10

6 dB можно набрать не только четырёхкратной мощностью передатчика: например, +3 dB на передающей антенне и +3 dB на приёмной также дают +6 dB бюджета в нужном направлении. Практическая дальность растёт хуже идеальной при перекрытии зоны Френеля, помехах, неправильной поляризации и замираниях.

Прирост мощности записывается в dB, а её абсолютные уровни — в dBm: переход 1 W = 30 dBm → 4 W = 36 dBm означает прирост +6 dB.

Иллюстрация источника: Як збільшити дальність у два рази: потужність або спрямована антена. (Изображение не включено в текстовую базу.)

Направленная антенна не создаёт дополнительную энергию: она перераспределяет её в меньший телесный угол. HPBW (Half-Power Beamwidth) — ширина главного лепестка между направлениями, где мощность падает на 3 dB относительно максимума. Если выигрыш +6 dBi получен только сужением диаграммы и остальные условия одинаковы, плотность мощности по оси возрастает примерно в 4 раза.

Иллюстрация источника: HPBW и плотность поля при переходе от штыревой к направленной антенне. (Изображение не включено в текстовую базу.)

Отрицательное значение dBm нормально для принятого сигнала. Например, -60 dBm сильнее, чем -90 dBm.

Усиление антенны не создаёт мощность

Антенна с большим dBi концентрирует излучение в определённых направлениях, забирая его из других направлений. Обычно это означает более узкую диаграмму направленности и более строгие требования к наведению.

Поэтому 8 dBi не означает, что антенна «добавляет 8 dBm мощности передатчику» во всех направлениях. Это усиление относительно эталонной антенны только в направлении

максимума диаграммы.

Указанное производителем усиление также не заменяет проверку рабочей частоты, поляризации, диаграммы, монтажа и KCB/SWR.

Как считать радиолинию

Эффективная изотропно излучаемая мощность:

$$\text{EIRP[dBm]} = \text{P_TX[dBm]} - \text{L_TX[dB]} + \text{G_TX[dBi]}$$

Ожидаемая мощность на входе приёмника:

$$\text{P_RX[dBm]} = \text{P_TX} - \text{L_TX} + \text{G_TX} - \text{L_path} + \text{G_RX} - \text{L_RX}$$

где:

- P_TX — мощность передатчика в dBm;
- L_TX, L_RX — потери кабелей, разъёмов и фильтров в dB;
- G_TX, G_RX — усиления антенн в dBi;
- L_path — потери распространения сигнала в dB.

Запас радиолинии:

$$\text{Margin[dB]} = \text{P_RX[dBm]} - \text{чувствительность приёмника[dBm]}$$

Пример: расчётный сигнал -90 dBm, порог приёмника -105 dBm. Запас равен 15 dB. Сравнивать порог и RSSI нужно для одного диапазона, режима и скорости передачи.

FPV-пример

Иллюстрация источника: Пример расчёта FPV-радиолинии. (Изображение не включено в текстовую базу.)

VTX выдаёт 1 W = 30 dBm. Кабель и разъёмы теряют 1 dB, антенна имеет 2 dBi:

$$\text{EIRP} = 30 - 1 + 2 = 31 \text{ dBm}$$

Это примерно 1,26 W EIRP в направлении максимума антенны. Реальная разрешённая EIRP зависит от диапазона и действующих местных правил.

Если на наземном приёмнике заменить антенну 2 dBi на направленную 8 dBi, выигрыш в главном лепестке составит 6 dB, то есть примерно в 4 раза по принятой мощности. Цена — более узкий сектор и необходимость точно направлять антенну.

В свободном пространстве удвоение расстояния добавляет примерно 6 dB потерь. Поэтому выигрыш 6 dB теоретически может дать около двукратной дальности, но препятствия, рельеф, ориентация, поляризация, помехи и зона Френеля обычно уменьшают практический результат.

Как читать показания и маркировку

- Мощность VTX: mW, W или dBm.
- Уровень принятого сигнала/RSSI: обычно dBm; менее отрицательное число означает более сильный сигнал.
- Усиление антенны: dBi либо dBd.
- Потери кабеля/разъёма/фильтра: dB.
- LQ/Link Quality — не dBm: это отдельный показатель качества принятых пакетов.

Быстрый алгоритм

1. Перевести мощность передатчика из mW/W в dBm.
2. Перевести dBd антенн в dBi, прибавив 2,15.

3. Прибавить усиление обеих антенн.
4. Вычесть потери кабелей, разъёмов и трассы.
5. Сравнить полученный P_{RX} с чувствительностью приёмника и получить запас в dB.
6. Отдельно проверить поляризацию, ориентацию, диапазон частот, КСВ и условия трассы: арифметика dB их не заменяет.

Первая зона Френеля

Смысл

- Оптическая прямая видимость (LoS) между антеннами ещё не гарантирует свободную радиолинию.
- Первая зона Френеля — эллипсоид вокруг прямой Tx–Rx. Для точек на его границе путь Tx–точка–Rx длиннее прямого пути на $\lambda/2$, то есть фаза отличается на 180° .
- Это не граница радиолуча: энергия распространяется и за пределами зоны. Зоны Френеля — способ оценить фазовое сложение волн, пришедших разными близкими путями.
- Препятствие в первой зоне закрывает часть поля, вызывает дифракцию, поглощение и иногда отражение. Поэтому уровень может упасть или стать нестабильным. Объяснять эффект только переотражением неправильно.

Иллюстрация источника: Первая зона Френеля и препятствия. (Изображение не включено в текстовую базу.)

Практическое правило

- В каждой точке трассы желательно иметь свободными не менее 60% радиуса первой зоны: расстояние от прямой Tx–Rx до земли, дерева, здания или техники должно быть не меньше $0,6 \cdot r_1$.
- Для надёжной стационарной радиолинии при возможности очищают всю первую зону и учитывают кривизну Земли, рефракцию атмосферы, растительность и запас на замирания.
- Препятствие, вершина которого доходит до самой прямой видимости, в модели одиночного «острого края» даёт около 6 dB дополнительных потерь. Реальная величина зависит от формы, материала, положения и многолучёвости.

Ориентировочные дифракционные потери

Таблица рассчитана по модели одиночного острого края ITU-R P.526. Положительный зазор означает, что вершина препятствия находится ниже прямой Tx–Rx.

Зазор от препятствия до прямой	Дополнительная потеря	Эквивалентный предел вместо 20 km*
$\geq 0,6 \cdot r_1$	около 0 dB	20 km
$0,5 \cdot r_1$	около 0,5 dB	18,9 km
$0,4 \cdot r_1$	около 1,5 dB	16,9 km
$0,2 \cdot r_1$	около 3,6 dB	13,1 km
вершина касается прямой	около 6 dB	10 km
вершина на $0,2 \cdot r_1$ выше прямой	около 8,5 dB	7,5 km
вершина на $0,5 \cdot r_1$ выше прямой	около 12 dB	5,1 km

* Пересчёт справедлив только как оценка по бюджету свободной радиолинии: исходные 20 km были пределом чувствительности, а мощность, усиление антенн и порог приёмника не меняются. Использовано $D_2 = D_1 \cdot 10^{(-L/20)}$. Это не расчёт автономности БПЛА.

- 3 dB — примерно половина принятой мощности; 6 dB — четверть; 10 dB — одна десятая; 20 dB — одна сотая.
- Широкий или округлый холм, несколько гребней, отражения и земля могут дать другой результат. Для них модель одного острого края только ориентир.

- Деревья добавляют не только дифракцию, но и поглощение/рассеяние. Около 1 GHz ITU приводит типичное удельное затухание леса порядка 0,17–0,2 dB/m, но подчёркивает очень большой разброс из-за породы, плотности, влажности, листвы и ветра.

Расчёт

Радиус первой зоны в точке между антеннами:

$$r_1 = \sqrt{(\lambda \cdot d_1 \cdot d_2 / (d_1 + d_2))}$$

Удобная форма, если расстояния заданы в километрах, а частота — в гигагерцах:

$$r_1 [\text{m}] = 17,3 \cdot \sqrt{(d_1 [\text{km}] \cdot d_2 [\text{km}] / (f [\text{GHz}] \cdot (d_1 + d_2) [\text{km}]))}$$

Максимальный радиус находится примерно в середине трассы. Для полной длины D:

$$r_{1, \text{max}} [\text{m}] = 8,66 \cdot \sqrt{(D [\text{km}] / f [\text{GHz}])}$$

Длина трассы	1 GHz: $r_{1, \text{max}}$ / 60%	5 GHz: $r_{1, \text{max}}$ / 60%
1 km	8,7 / 5,2 m	3,9 / 2,3 m
5 km	19,4 / 11,6 m	8,7 / 5,2 m
10 km	27,4 / 16,4 m	12,2 / 7,3 m
20 km	38,7 / 23,2 m	17,3 / 10,4 m

Иллюстрация источника: Сравнение первой зоны Френеля на 1 и 5 GHz для трассы 10 km. (Изображение не включено в текстовую базу.)

Радиус изменяется как $1/\sqrt{f}$: при переходе с 1 на 5 GHz он уменьшается в $\sqrt{5} \approx 2,24$ раза. Для 900 MHz значения примерно на 5% больше, чем для 1 GHz; для 5,8 GHz — примерно на 7% меньше, чем для 5 GHz.

Пример с машиной в долине

- Нужно провести прямую между фазовыми центрами антенн и измерить зазор от этой прямой до крыши машины в месте её нахождения.
- Если машина стоит глубоко ниже зоны, она практически не влияет, хотя географически находится между антеннами.
- Для трассы 10 km в середине безопасный ориентир по зазору составляет около 16 м на 1 GHz и 7 м на 5 GHz. Это расстояние от прямой радиолинии до верхней точки препятствия, а не высота антенн над землёй вообще.
- Одиночная машина обычно закрывает лишь малую часть поперечного сечения зоны. Гребень, лесополоса, дом или склон, перекрывающие значительную часть зоны, опаснее.

FPV-примеры около 1 GHz

Схемы относятся к геометрии радиолинии управления/видео, а не к запасу аккумулятора. Дистанции и размеры объектов на рисунках условные.

Как зона расширяется с дистанцией

Иллюстрация источника: Первая зона Френеля на трассах 5 и 20 km около 1 GHz. (Изображение не включено в текстовую базу.)

Как 4 dB потерь превращают условные 20 km примерно в 13 km

Иллюстрация источника: Сравнение максимальной радиодальности свободной и частично перекрытой трассы. (Изображение не включено в текстовую базу.)

Статус сведений

Это самостоятельно проверенные сведения, а не перенос из учебных материалов курса.

Основа: ITU-R P.526 (дифракция и зоны Френеля), ITU-R P.833 (затухание в растительности) и справка Cambium LINKPlanner.