

Aula 15 - Segurança: Certificados, Diffie-Hellman, E-mail Seguro

Diego Passos

Universidade Federal Fluminense

Redes de Computadores II

Na Última Aula (I)...

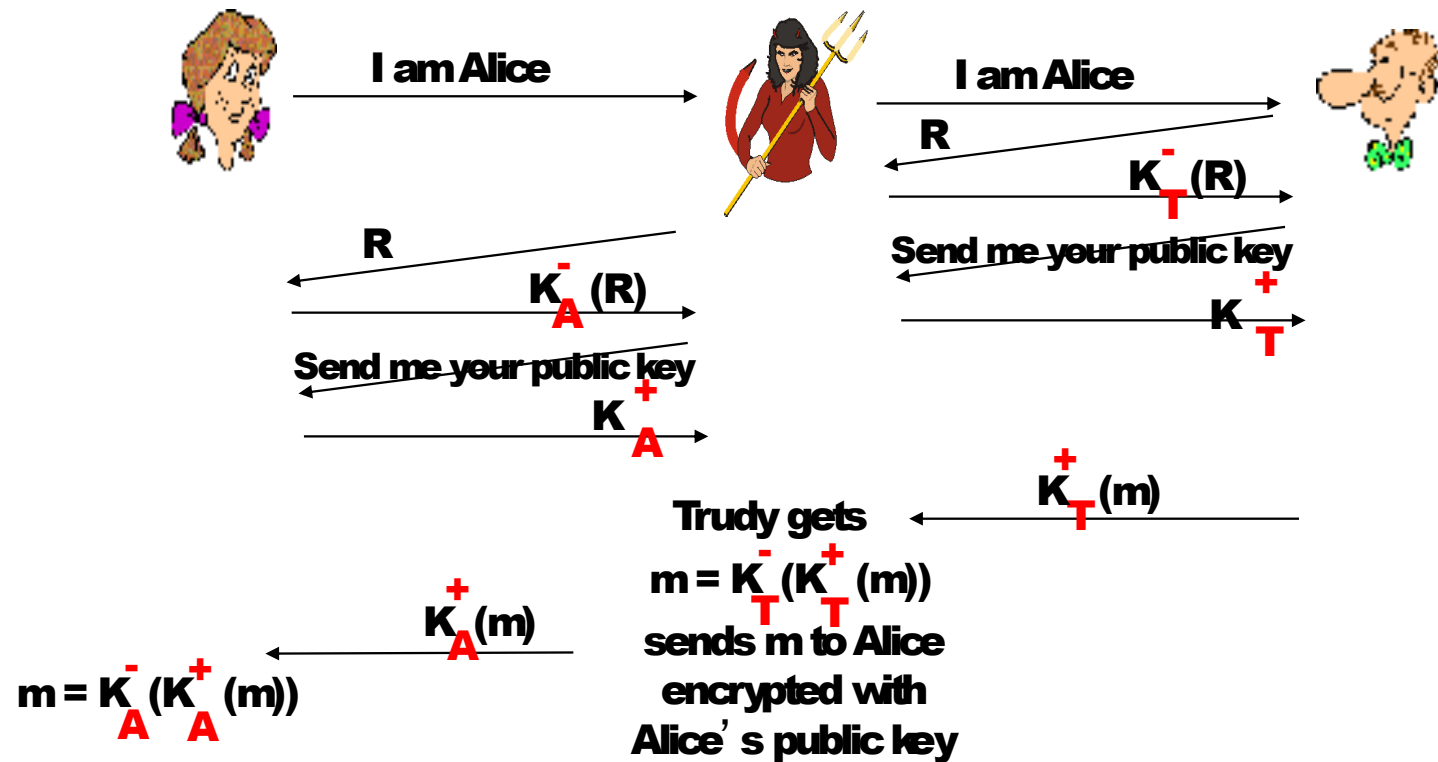
- Autenticação: Objetivo.
 - Provar que as **partes são quem afirmam ser**.
- Autenticação: dificuldades.
 - Atacante pode **forjar identidade**.
 - Atacante pode **forjar endereço IP**.
 - Atacante pode **repetir pacotes legítimos enviados**.
 - Mesmo criptografados.
- Autenticação: **nonce**.
 - Número **aleatório** que “não se repete”.
 - Enviado como um **desafio**.
 - “Prove sua identidade **cifrando o nonce**”.
 - Criptografia simétrica ou de chave pública.
 - Ainda vulnerável a ataque do tipo *man-in-the-middle*.

Na Última Aula (II)...

- Integridade: objetivo.
 - Ser capaz de **verificar** se mensagem foi **alterada pelo atacante**.
 - Bytes foram removidos, adicionados ou alterados.
- Integridade: abordagens.
 - Enviar mensagem e versão criptografada com chave privada.
 - Funciona, mas tem alto custo computacional.
 - Alternativa: assinatura digital.
 - Enviar mensagem e **resumo criptográfico cifrado** com a chave privada.
 - Resumo é **pequeno, irreversível** e muda bastante com alterações na mensagem.
 - Requer criptografia.
 - Alternativa: MAC.
 - *Message Authentication Code*.
 - Usa **segredo compartilhado**.
 - Mas apenas **concatena** mensagem e segredo.
 - O MAC é o *hash* desta concatenação.
 - MAC é mais leve, mas assinatura digital provê automaticamente identidade do transmissor.

Relembrando: Problema de Segurança do ap5.0

- **Ataque do tipo *man-in-the-middle*:** Trudy se passa por Alice (para Bob) e por Bob (para Alice).



Certificação de Chave Pública (I)

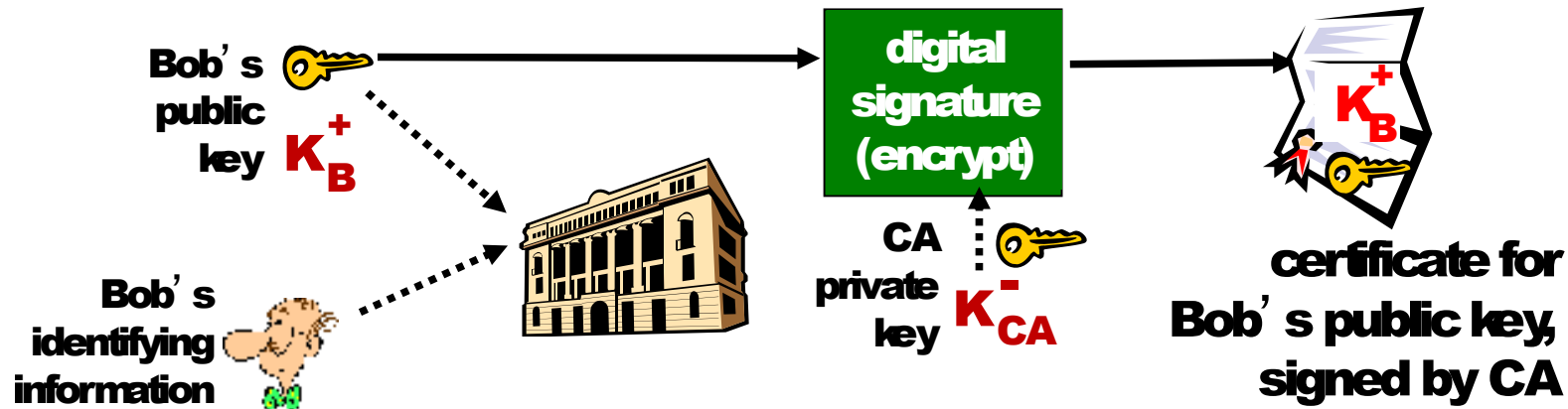
- Motivação: Trudy faz “pegadinha da pizza” com Bob:
 - Trudy cria um e-mail de pedido: *Cara Pizzaria, por favor me entregue 4 pizzas de Pepperoni. Obrigado, Bob.*
 - Trudy assina pedido com a sua chave privada.
 - Trudy envia pedido a pizzaria.
 - Trudy envia sua chave pública para a pizzaria, mas afirmando ser a chave pública de Bob.
 - Pizzaria confere assinatura e, então, entrega as 4 pizzas para Bob.
 - Bob sequer gosta de pizza de pepperoni.

Certificação de Chave Pública (II)

- Nos dois exemplos anteriores, o uso de criptografia de chave pública **não** impediu ataques.
- Motivo: método de distribuição de chaves.
 - Chave pública foi “entregue” pelo próprio atacante.
 - Alice e pizzaria simplesmente aceitaram as chaves como sendo verdadeiras.
 - Não realizaram nenhum tipo de **autenticação** da chave.
- Mas como Alice e a pizzaria poderiam verificar a autenticidade da chave pública de Bob?
- Ideia: analogia com a vida real.
 - Recebemos um documento (e.g., um contrato) assinado por um indivíduo.
 - Como determinamos que a assinatura não é falsa?
 - Podemos utilizar um cartório: reconhecimento de firma.
 - Cartório “certifica” que a assinatura é verdadeira.

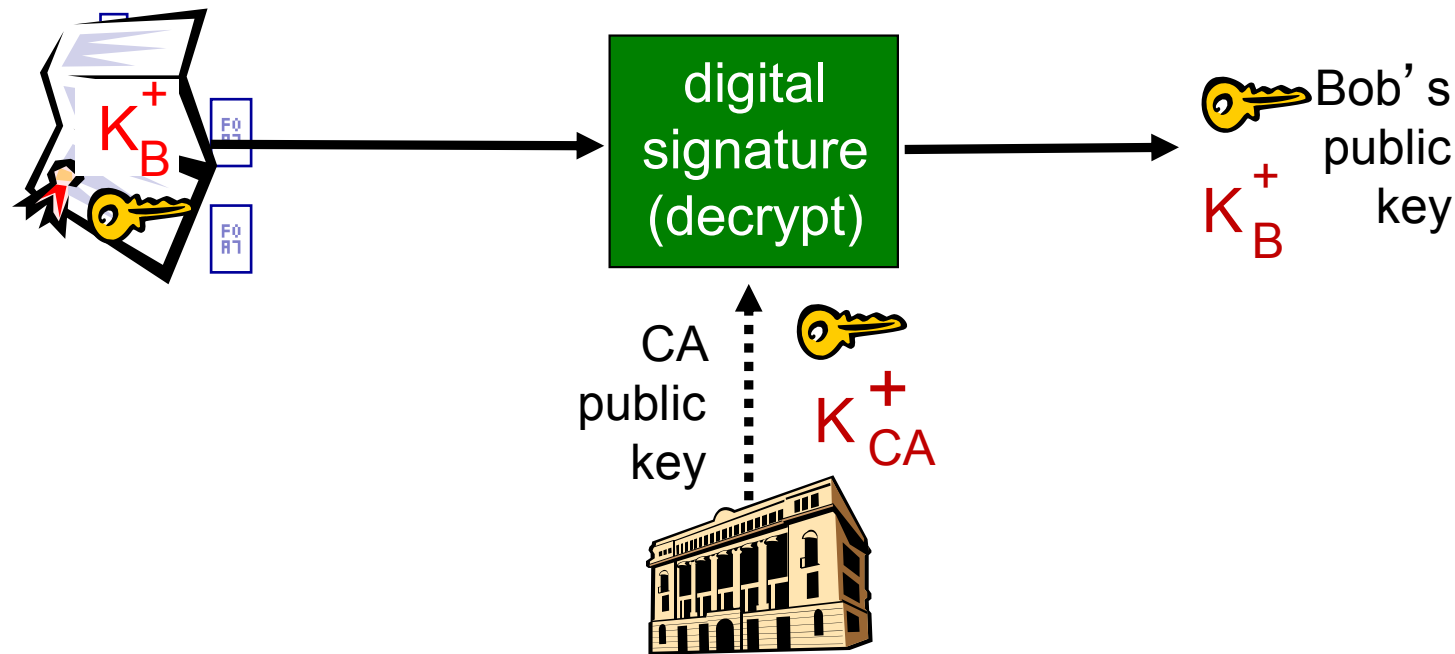
Autoridades Certificadoras (I)

- **Certification Authority (CA):** mapeia chaves públicas a entidade particular E.
- E (pessoa, roteador) registra sua chave pública com a CA.
 - E provê “prova de identidade” à CA.
 - CA cria certificado ligando E a sua chave pública.
 - Certificado contém chave pública de E assinada digitalmente pela CA – CA afirma “esta é a chave pública de E”.



Autoridades Certificadoras (II)

- Quando Alice quer a chave pública de Bob:
 - Obtém o certificado de Bob (com Bob ou por qualquer outro meio).
 - Aplica a chave pública da CA ao certificado do Bob, obtém a chave pública de Bob.



Autoridades Certificadoras (III)

- Solução baseada no princípio da **terceira parte confiável**.
 - Ao receber um certificado, Alice **confia** que a chave de Bob é legítima porque **confia na autoridade certificadora**.
 - Assumindo, é claro, que Alice seja capaz de **verificar a assinatura** do certificado.
- Diferente da chave pública sozinha, Alice pode receber o certificado diretamente da outra parte.
 - Graças a **verificabilidade da autenticidade** do certificado.
 - Atacante pode até enviar um certificado falso, mas Alice **deve** ser capaz de detectar.

Certificados Raiz

- Mas... Como Alice obtém a chave pública da CA?
- Parece que apenas “mudamos o problema de lugar”.
 - Sim e não.
 - De fato, Alice ainda precisa obter de forma segura o certificado da CA.
 - Simplesmente se conectar à CA, pedindo a chave pública pela rede, traz os mesmos problemas que tínhamos anteriormente.
 - Por outro lado, há (relativamente) **poucas CAs** no mundo.
 - Algumas poucas CAs certificam um enorme número de entidades na Internet.
 - Logo, a **escala do problema** é menor.
- Solução típica:
 - *Software* usado para comunicação segura (e.g., o browser) já traz conjunto de **certificados raiz**.
 - Certificados contendo chaves públicas de CAs.
 - Implicitamente, clientes **assumem** que estes certificados são legítimos.

Hierarquia de Certificados

- Verificação de um certificado não é necessariamente feita de forma “direta”.
 - i.e., pode ser necessário verificar uma **cadeia** de certificados.
- Exemplo:
 - Bob envia seu certificado assinado pela CA_1 .
 - Obtemos a chave pública da CA_1 através do seu certificado, assinado pela CA_2 .
 - Obtemos a chave pública da CA_1 através do seu certificado, assinado pela CA_3 .
 - ...
 - Obtemos a chave pública da CA_{n-1} através do seu certificado, assinado pela CA_n .
 - Possuímos um certificado **raiz** da CA_n no qual confiamos **implicitamente**.

Certificados: Campos Importantes

- Além da informação da chave pública e da assinatura, certificados contêm:
 - Número de série.
 - Descrição dos algoritmos usados (*e.g.*, para a assinatura digital).
 - Identificação do emissor.
 - Identificação da entidade certificada.
 - **Validade** (certificado não deve ser aceito antes/depois de certa data).
 - ...

Certificados: Revogações

- Uma CA pode **revogar** um certificado por várias razões. Exemplos:
 - A entidade certificada foi (ou pode ter sido) comprometida.
 - A própria CA foi (ou pode ter sido) comprometida.
 - Certificado foi suplantado por outro.
 - ...
- Além de verificar assinatura digital do certificado (ou cadeia de certificados), cliente deve verificar ele não foi revogado.
- Solução mais tradicional: CRL.
 - *Certificate Revocation List* (lista de revogação de certificados).
 - Documento emitido periodicamente pelas CAs.
 - Assinado digitalmente pela CA.
- Alternativa mais recente: OCSP.
 - *Online Certificate Status Protocol*.
 - Cliente requisita *status* de revogação do certificado.

PKI: Public Key Infrastructure

- Note nesta solução para distribuição de chaves públicas, as partes que desejam se comunicar não são **suficientes**.
 - São necessários outros componentes, entidades.
 - Como as CAs, os certificados raízes, etc.
 - Em outras palavras, solução requer uma **infraestrutura**.
- Uso de certificados digitais e CAs para gerenciamento/distribuição de chaves públicas define uma PKI.
 - *Public Key Infrastructure*, ou Infraestrutura de Chave Pública

Diffie-Hellman

Estabelecimento de Chaves Compartilhadas (I)

- Há algumas aulas atrás, discutimos as **diferenças** entre criptografia de chave pública e de chave simétrica.
- Em particular, vimos que a criptografia de chave simétrica tem **menor complexidade computacional**.
 - *i.e.*, cifrar/decifrar mensagens é “mais rápido”.
- Resultado:
 - Criptografia de chave simétrica é mais usada para confidencialidade.
 - Criptografia de chave pública ainda é extremamente útil, mas é mais usada para outros objetivos.
 - *e.g.*, assinaturas digitais, autenticação.
- Problema: como estabelecer uma chave simétrica secreta entre duas partes?
 - Complicador: chaves simétricas são geralmente **chaves de sessão**, *i.e.*, mudam a cada nova sessão de comunicação.

Estabelecimento de Chaves Compartilhadas (II)

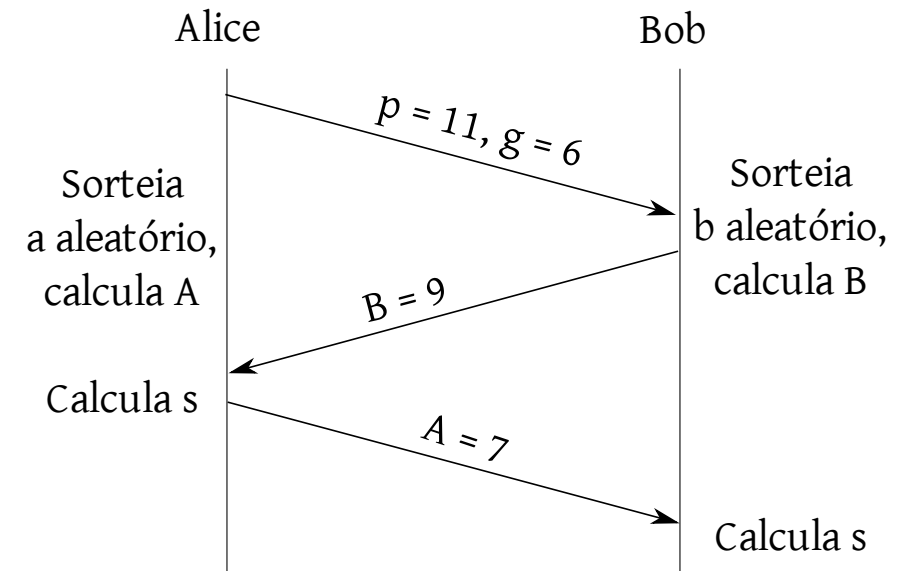
- Uma opção (bastante comum) é a utilização de criptografia de chave pública para o estabelecimento de uma chave simétrica.
 - e.g., Alice cria uma chave de sessão aleatória e a cifra com a chave pública de Bob.
 - Alice envia chave de sessão cifrada para Bob.
 - Bob usa sua chave privada para decifrar chave de sessão.
 - Alice e Bob passam a usar criptografia de chave simétrica.
- Problema: Alice precisa conhecer chave pública de Bob.
 - Sabemos resolver isso através de uma PKI.
 - Mas e se não tivermos acesso uma PKI?

Diffie-Hellman

- Método para estabelecimento de chave secreta compartilhada através de canal não-seguro.
- Não supõem qualquer tipo de conhecimento prévio das partes.
- Funcionamento:
 - Alice e Bob definem dois números, p e g .
 - p é um **número primo grande**.
 - g deve ser uma **raiz primitiva módulo p** .
 - i.e., para todo inteiro i , coprimo com p , existe k tal que $g^k \equiv i \pmod{p}$.
 - p e g **não são secretos**, podem ser padronizados ou mesmo enviados em texto plano pelo canal.
 - Alice e Bob sorteiam números aleatórios a e b , respectivamente (**devem ser mantidos em segredo!**).
 - Alice calcula $A = g^a \pmod{p}$ e envia para Bob.
 - Bob calcula $B = g^b \pmod{p}$ e envia para Alice.
 - Bob calcula $s = A^b \pmod{p}$.
 - Alice calcula $s = B^a \pmod{p}$.
 - s é a chave simétrica secreta.

Diffie-Hellman: Exemplo Numérico

- Alice e Bob definem $p = 11$ e $g = 6$.
 - Decisão pode ser padronizada ou baseada em troca de mensagens.
 - Potencial atacante pode conhecer p e g **sem prejuízo** de segurança.
- Alice e Bob sorteiam valores aleatórios a e b , respectivamente.
 - $a = 3$.
 - $b = 4$.
- Alice e Bob calcular os valores A e B , respectivamente.
 - $A = g^a \bmod p = 6^3 \bmod 11 = 7$.
 - $B = g^b \bmod p = 6^4 \bmod 11 = 9$.
- Alice e Bob transmitem A e B um para o outro.
 - Potencial atacante pode conhecer A e B .
- Alice e Bob calculam chave compartilhada s .
 - Alice: $s = B^a \bmod p = 9^3 \bmod 11 = 3$.
 - Bob: $s = A^b \bmod p = 7^4 \bmod 11 = 3$.



Diffie-Hellman: Por Que Funciona?

- Análise em duas partes: porque Alice e Bob chegam ao mesmo valor s e porque Trudy não consegue.

Alice e Bob

- Alice calcula $s = B^a \bmod p$.
- Bob calcula $s = A^b \bmod p$.
- Mas $A = g^a \bmod p$ e $B = g^b \bmod p$.
- Logo:
 - Alice: $s = (g^b)^a \bmod p = g^{ab} \bmod p$.
 - Bob: $s = (g^a)^b \bmod p = g^{ab} \bmod p$.

Trudy

- Suponha que conhece g , p , A e B .
- Sabemos que $s = g^{ab} \bmod p$.
- Com as informações que possui, Trudy precisaria de a ou b .
- Teoricamente, é possível calcular a (ou b) sabendo g , p e A (ou B).
 - Mas é computacionalmente inviável se p é um **primo grande**.
 - Problema do **logaritmo discreto**.

Diffie-Hellman: Ataque *Man-In-The-Middle* (I)

- Vulnerabilidade do método: ataque do tipo *man-in-the-middle*.
- Suponha que Trudy pode interceptar as mensagens entre Alice e Bob e trocá-las por mensagens próprias.
 - Alice envia A para Bob, Trudy intercepta e envia um A' (baseado em um a' conhecido por Trudy).
 - Bob envia B para Alice, Trudy intercepta e envia um B' (baseado em um b' conhecido por Trudy).
 - Alice calcula um s' que pode ser facilmente calculado por Trudy.
 - Bob calcula um s'' que pode ser facilmente calculado por Trudy.
- Resultado: Trudy **conhece ambas as chaves de sessão** utilizadas por Alice e Bob.
 - Pode decifrar toda a comunicação criptografada.

Diffie-Hellman: Ataque *Man-In-The-Middle* (II)

- Qual a utilidade do Diffie-Hellman, então?
 - Poderíamos simplesmente ter usado um método de criptografia de chave pública (e.g., RSA).
 - Justificativa inicial: sem PKI, Alice não pode obter chave pública de Bob de forma segura.
 - Bob poderia simplesmente enviá-la pelo canal, mas ficaria susceptível ao ataque de *man-in-the-middle*.
 - Mas com Diffie-Hellman estamos susceptíveis de qualquer forma!
- Duas razões:
 - Primeira: quando proposto, métodos práticos de criptografia de chave pública não eram difundidos.
 - Segunda: usado **em conjunto** com criptografia de chave pública, Diffie-Hellman oferece algumas vantagens.

Exemplo de Uso Atual de Diffie-Hellman: SSH (I)

- Protocolo de *shell* remoto **seguro**.
 - Alternativa segura, por exemplo, ao telnet.
 - Provê confidencialidade, integridade, autenticação do cliente com o servidor e do servidor com o cliente (sob algumas hipóteses).
- Dados são cifrados com criptografia de chave simétrica.
 - Usando uma nova chave de sessão a cada conexão.
 - Chave de sessão é **estabelecida usando Diffie-Hellman** (ou variantes).
- Autenticação do servidor com o cliente é feita através de criptografia de chave pública.
 - Opcionalmente, criptografia de chave pública é usada para autenticar o usuário com o servidor.

SSH: Funcionamento Básico

- Cliente abre conexão TCP para o servidor (por padrão, na porta 22).
- Cliente e servidor selecionam um algoritmo de estabelecimento de chaves de uma lista de algoritmos suportados.
 - Diffie-Hellman ou alguma variação.
- Cliente e servidor executam o algoritmo de estabelecimento de chave secreta compartilhada.
- Servidor se autentica com o cliente.
 - Utiliza criptografia de chave pública (*e.g.*, RSA, DSA) e *hash* criptográfico para assinar chave simétrica.
 - Cliente autentica servidor usando sua chave pública (enviada pelo próprio servidor) para verificar assinatura.
- Cliente e servidor se comunicam cifrando mensagens com a chave compartilhada.
 - Mensagens incluem verificações de integridade usando MAC.

SSH e Man-In-The-Middle (I)

- Se o servidor envia sua chave pública, do que adianta a autenticação do ssh?
- Ideia é que o cliente **conheça previamente** a chave pública do servidor.
 - Chave é obtida antes de **alguma forma segura**.
 - Neste caso, cliente não precisa **confiar** na chave que recebe pela rede.
- Mas...
 - Na prática, isso nem sempre ocorre.
 - Servidor pode precisar gerar novas chaves.
 - *e.g.*, porque o sistema foi reinstalado e chaves foram perdidas.
 - Ainda mais comum: **usuários não têm o cuidado** de obter a chave pública previamente.

SSH e Man-In-The-Middle (II)

- Solução prática:
 - Servidor envia chave pública, cliente verifica se esta bate com a previamente conhecida.
 - Se não bate (ou se não há chave previamente conhecida), usuário é alertado.
 - *Software* pede que usuário confirme a identidade do servidor.
 - **Assumindo que a primeira conexão seja realizada com o servidor real**, ssh consegue garantir autenticidade.
- Em resumo:
 - Diffie-Hellman ainda é susceptível ao ataque *man-in-the-middle*.
 - Mas **chave resultante** é assinada com criptografia de chave pública, permitindo detectar o ataque.
 - *Man-in-the-middle* e outros.

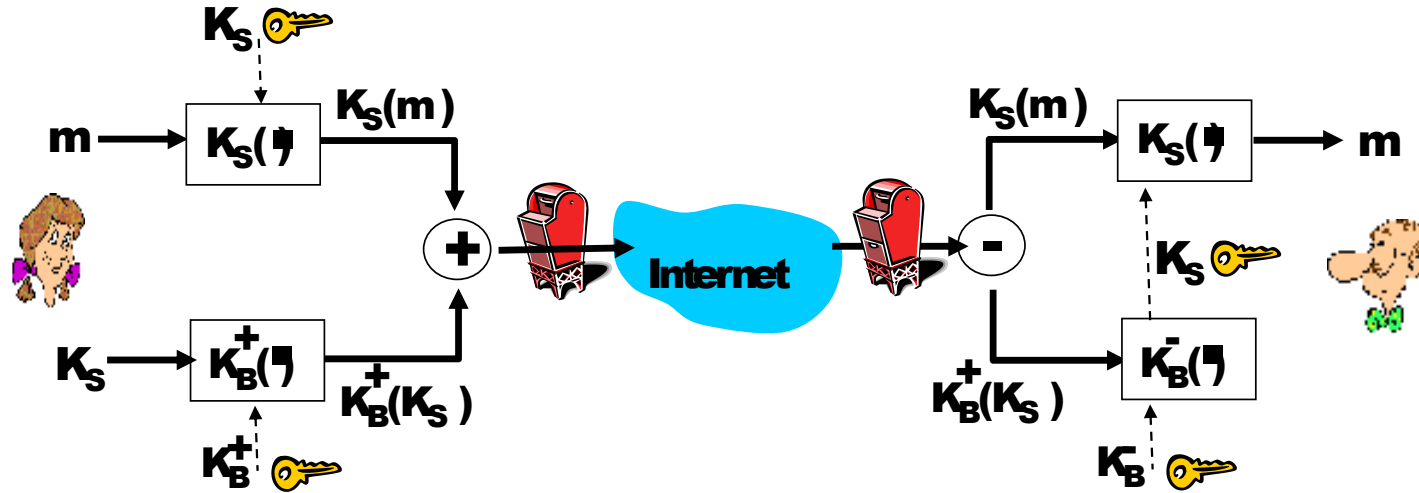
SSH e Diffie-Hellman: Vantagens

- **Pergunta:** se dependemos da confiança na chave pública, qual é a vantagem em usar o Diffie-Hellman?
- **Resposta:** Diffie-Hellman provê *forward secrecy*.
 - Propriedade muito interessante em criptografia.
 - A chave usada para cifrar os dados da sessão SSH é **efêmera**
 - **Parâmetros** usados para gerá-la também.
 - Além disso, chave **nunca é transmitida pelo canal** (cifrada ou não).
 - Ainda que o atacante...
 - “Grave” todas mensagens cifradas/texto plano; e
 - Futuramente consiga **comprometer** as chaves privadas (permanentes).
 - ... não há como **decifrar sessões passadas**.

E-mail Seguro

E-mail Seguro (I)

- Alice quer enviar e-mail confidencial, m , para Bob.

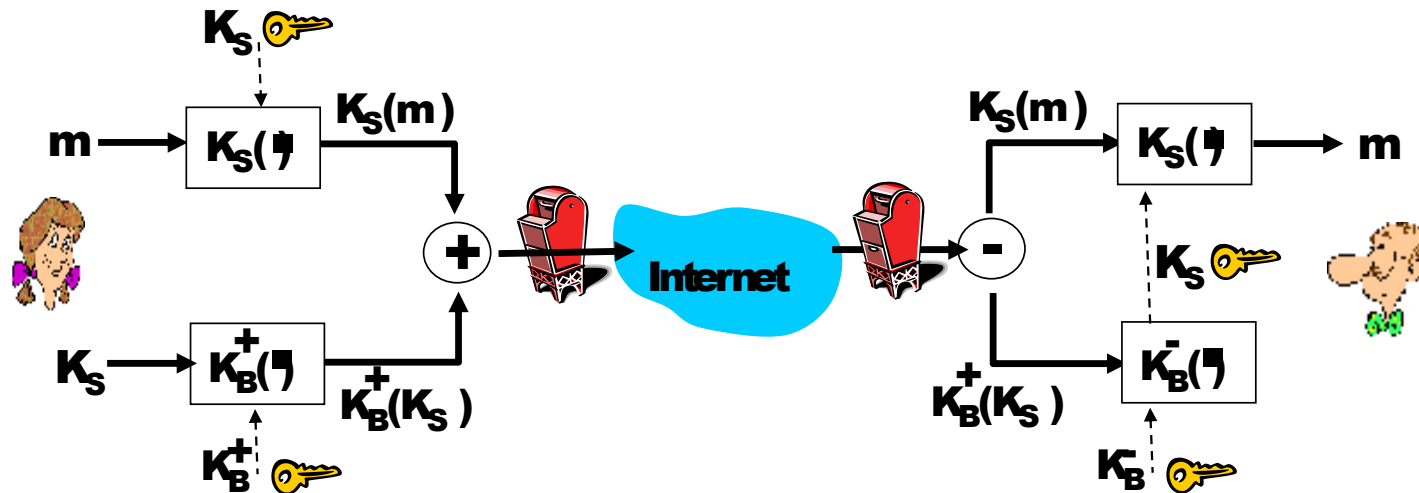


- **Alice:**

- Gera aleatoriamente chave simétrica privada, K_S
- Cifra mensagem com K_S (por razões de eficiência).
- Também cifra K_S com a chave pública de Bob.
- Envia ambas $K_S(m)$ e $K_B^+(K_S)$ a Bob.

E-mail Seguro (II)

- Alice quer enviar e-mail confidencial, m , para Bob.

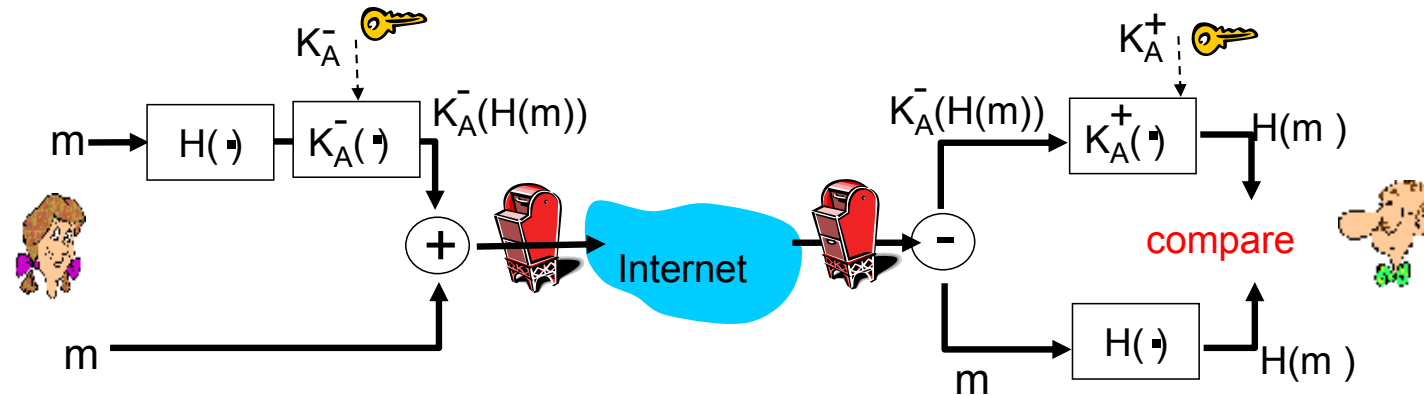


- **Bob:**

- Usa sua chave privada para decifrar e recuperar K_S .
- Usa K_S para decifrar $K_S(m)$ e recuperar m .

E-mail Seguro (III)

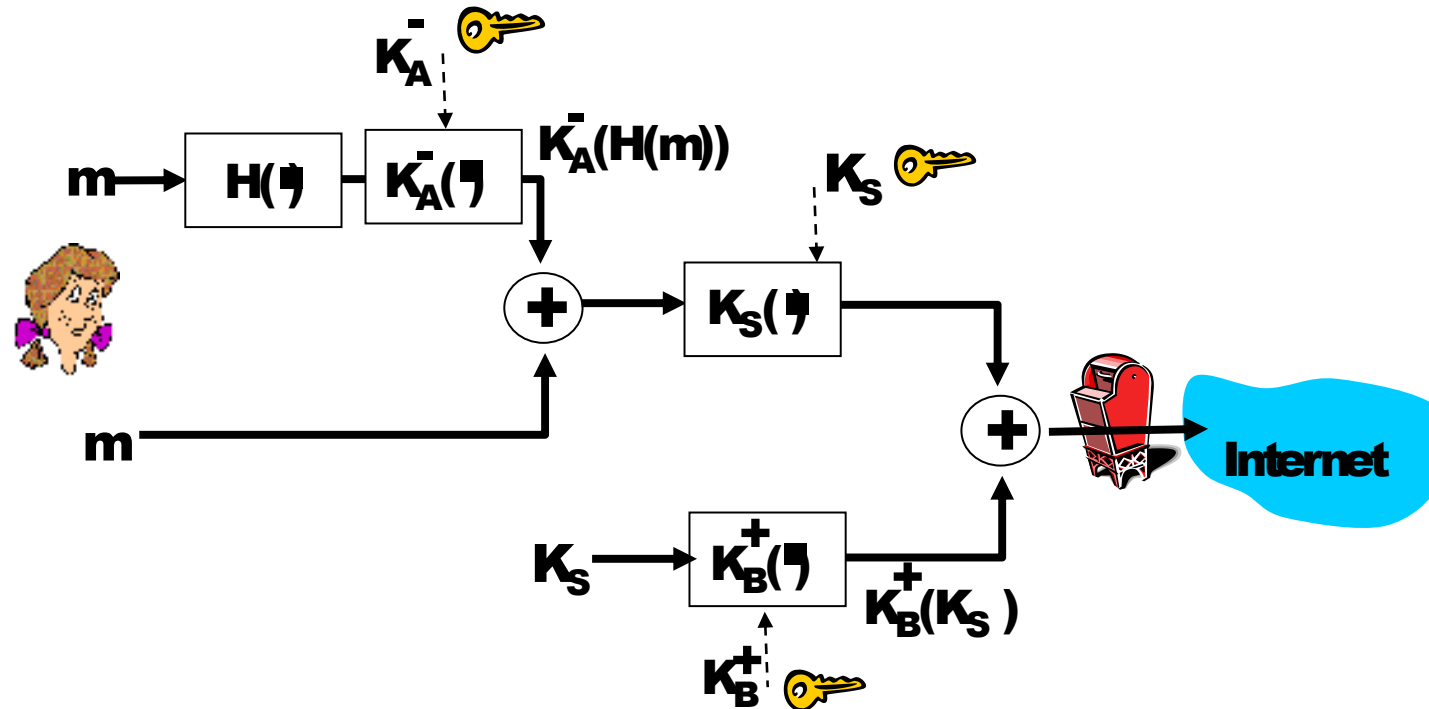
- Alice quer prover meios de verificação da integridade e autenticidade da mensagem.



- Alice assina digitalmente a mensagem.
- Envia ambas a mensagem (em texto plano) e a assinatura digital.

E-mail Seguro (IV)

- Alice quer prover confidencialidade, integridade e autenticidade da mensagem.



- **Alice usa três chaves:** sua chave privada, a chave pública de Bob e a chave simétrica recém criada.

Resumo da Aula... (I)

- Certificação de chave pública: objetivo.
 - Garantir **autenticidade** de chaves públicas.
- Certificação de chave pública: solução.
 - **Terceira parte confiável** certifica autenticidade da chave.
 - CA: *Certification Authority*.
 - Emite um “documento” **verificável** contendo a chave.
 - Assinado digitalmente com a chave privada da CA.
- Certificação de chave pública: verificação.
 - Alice **obtém certificado** de Bob.
 - Alice verifica assinatura digital com a **chave pública** da CA.
 - Alice obtém chave pública de Bob.
- Certificados raiz:
 - Certificados **previamente conhecidos**.
 - **Confiança implícita** na sua autenticidade.
 - Contém chaves públicas de CAs.
- Hierarquia de Certificados:
 - Alice pode precisar verificar uma **cadeia** de certificados.
 - CA_n certifica CA_{n-1} , que certifica CA_{n-2} , ..., que certifica Bob.
- Certificados apresentam **validade**.
- CAs podem **revogar** certificados.
- PKI: *Public Key Infrastructure*.
 - Infraestrutura para distribuir/verificar chaves públicas.
 - Exemplo: CAs + Certificados.

Resumo da Aula... (II)

- Diffie-Hellman:
 - Método para **estabelecimento seguro de chaves** compartilhadas.
 - Não requer **conhecimento prévio** das partes.
 - Partes concordam em parâmetros **não secretos** p e g .
 - Também enviam em texto plano $A = g^a \bmod p$ e $B = g^b \bmod p$.
 - a e b são mantidos secretos.
 - Chave compartilhada é $s = B^a \bmod p = A^b \bmod p$.
 - **Sem método de autenticação**, é susceptível a ataque *man-in-the-middle*.
- E-mail seguro: diferentes possíveis objetivos.
 - **Confidencialidade**: chave simétrica de sessão, cifrada com chave pública do destinatário.
 - **Integridade e Autenticidade**: assinatura digital com chave privada.

Leitura e Exercícios Sugeridos

- Certificação de chaves públicas:
 - Páginas 510 a 512 do Kurose (parte final da Subseção 8.3.3).
 - Exercício de fixação 14 do Capítulo 8 do Kurose.
 - Problema 14 do Capítulo 8 do Kurose.
- Diffie-Hellman:
 - Seção 8.7.2 do Tanenbaum.
 - Problema 9 do Capítulo 8 do Kurose.
- E-mail seguro:
 - Páginas 516 a 521 do Kurose (parte final da Seção 8.4).
 - Exercício de fixação 19 do Capítulo 8 do Kurose.
 - Problemas 17 e 18 do Capítulo 8 do Kurose.

Próxima Aula...

- Discutiremos um dos principais protocolos de segurança utilizados na Internet.
 - SSL: *Secure Sockets Layer*.
 - Adiciona serviços de segurança no transporte de dados na Internet.
 - Confidencialidade.
 - Autenticação.
 - Integridade.